

Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra automatizace a výpočetní techniky v metalurgii

# Diplomová práce

*Fuzzy regulátor*

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Hana Machů**

Studijní program:

N3922 Ekonomika a řízení průmyslových systémů

Studijní obor:

3902T042 Automatizace a počítačová technika v průmyslových technologiích

Téma:

Fuzzy regulátor

Fuzzy regulator

Zásady pro vypracování:

1. Regulátory a regulované soustavy.
2. Princip fuzzy řízení.
3. Návrh a realizace báze znalostí fuzzy regulátoru.

1. Regulators and the regulated systems.
2. The principle of fuzzy control.
3. Proposal and realization of knowledge base of fuzzy regulator.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. BABUSKA, R. Fuzzy Modeling for Control. Kluwer Academic Publishers Norwell, MA, USA, 1998. ISBN:0792381548.
2. NOVÁK, V. Základy fuzzy modelování. BEN - technická literatura. 2002. ISBN 80-7300-009-1.
3. YING, H. Fuzzy Control and Modeling: Analytical Foundations and Applications. Wiley-IEEE Press, 2000. ISBN:0780334973.
4. KRUSE, R., GEBHARDT, J.E., KLOWON, F. Foundations of Fuzzy Systems. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, 1994. ISBN:047194243X.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří David, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Švec, Ph.D.

Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 20.04.2015

  
prof. Ing. Zora Jančíková, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# Zásady pro vypracování diplomové práce

## I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

Uspořádání diplomové práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah DP                  |
| 2. Originál zadání DP                        | 7. Textová část DP           |
| 3. Zásady pro vypracování DP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra . . . . .*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2014/2015.

Ostrava 4. 11. 2014

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

## MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě ..... 20.4.2015 .....

.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

**Abstrakt:**

Tématem diplomové práce je obecně fuzzy regulátor. Je zde popsán hlavní princip fuzzy teorie, podstata fuzzy množin a operace s nimi. Dále se práce zabývá strukturou fuzzy regulátorů, přičemž je zaměřena na fuzzy regulátory s inferenčním mechanismem typu Mamdani. Experimentální část je zaměřena na tvorbuází pravidel pro základní typy regulátorů, která probíhala v expertním systému NTS. Výsledky jednotlivýchází pravidel jsou v práci srovnány a vyhodnoceny.

**Klíčová slova:**

fuzzy logika, fuzzy regulace, fuzzy regulátor, expertní systém, báze pravidel, regulační odchylka

**Abstract:**

Diploma topic is generally fuzzy controller. There is described a main principle of fuzzy theory, the essence of fuzzy sets and operations with them. The thesis also focuses the structure of fuzzy controllers, and it is aimed at controllers with fuzzy inferential mechanism of Mamdani. The experimental part focuses on the creation of the basic types of controllers, which took place in the expert system NTS. Results of individual base rules are at work compared and evaluated.

**Key words:**

fuzzy logic, fuzzy kontrol, fuzzy controller, expert systém, rule base, control difference

## **Poděkování**

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Davidovi, Ph.D. za cenné rady, ochotu a čas věnovaný konzultacím při tvorbě diplomové práce.

## Seznam použitých symbolů

$\mu_A(x)$	funkce příslušnosti k fuzzy množině A
$\int_y \mu(y) dy$	plocha fuzzy množiny
$\bar{y}^k$	špičková hodnota fuzzy množiny, která se nachází v konsekvant k-tého pravidla
$w^k$	výška fuzzy množiny daná hodnotou antecedentu daného pravidla
$e(k)$	regulační odchylka v k-tém kroku
$\Delta e(k)$	změna regulační odchylky v k-tém kroku
$u(k)$	akční zásah v k-tém kroku
$\Delta u(k)$	změna akčního zásahu v k-tém kroku
$w(k)$	žádaná hodnota v k-tém kroku
$y(k)$	regulovaná veličina v k-tém kroku
$K_R$	zesílení regulace
<b>HODNOTA</b>	symbolické jméno hodnoty jazykové proměnné
$K_I$	integrační zisk
$K_D$	derivační časová konstanta
$T$	časová konstanta
$K$	zesílení soustavy
<b>IM</b>	inferenční mechanismu
<b>F</b>	fuzzifikace
<b>D</b>	defuzzifikace
<b>N</b>	počet pravidel



<b>TSK</b>	Takagi-Sugeno-Kangov regulátor
<b><math>u(k-1)</math></b>	akční zásah v kroku $k-1$
<b><math>e(k-1)</math></b>	regulační odchylka v kroku $k-1$
<b>max</b>	maximum
<b>min</b>	minimum

# OBSAH

1. ÚVOD .....	1
2. FUZZY LOGIKA.....	3
2.1 Fuzzy množiny .....	3
2.2 Operace s fuzzy množinami.....	5
3. FUZZY REGULACE.....	8
4. FUZZY REGULÁTOR.....	18
4.1 Základní typy Mamdaniho fuzzy regulátorů .....	20
5. NÁVRH BÁZE PRAVIDEL FUZZY REGULÁTORU .....	25
5.1 Způsoby sestavení báze pravidel.....	26
5.2 Tvorba báze pravidel v expertním systému NTS.....	28
5.3 Ladění báze pravidel.....	31
5.5 Srovnáníází pravidel.....	33
5.4 Fuzzy Logic Toolbox .....	46
6. ADAPTIVNÍ FUZZY REGULÁTOR.....	50
7. ZÁVĚR.....	52

## 1. Úvod

**Fuzzy** = neostrý, neurčitý, rozmazaný, vágní, mlhavý

*Čím lépe matematické zákony popisují realitu, tím jsou méně přesné, a čím jsou přesnější, tím hůře popisují realitu.*

*Albert Einstein*

Fuzzy logiku vyvinul v roce 1965 profesor elektrotechniky Lofti A. Zadeh, který přednášel na kalifornské univerzitě v Berkeley. Původem Íránec, žijící v USA, přišel na myšlenku fuzzy množin při přiřazování neurčitých prvků množinám. Jeho myšlenkou bylo nepřirazovat objekty množinám na základě konkrétních hraničních hodnot, ale pracovat s neurčitostí. Definoval proto tzv. sílu příslušnosti (membership) každého prvku k dané množině. Síla příslušnosti může plynule nabývat hodnot od nuly k jedné. Zadeh si uvědomil, že lidé jsou schopni rozhodovat i na základě neurčitosti, vágní a nenumernické informace a dosahují mnohdy lepších výsledků než stroje. Zavedl proto pojem jazykové proměnné, jejichž hodnotou nejsou čísla, ale slova.

Teorie *mlhavých množin* narazila tehdy na nepochopení a odpor exaktních matematiků a informatiků. V západním světě vyvolávala nová teorie u vědců jen smích. Jinak tomu bylo na Dálném východě (Japonsko, Čína). Uvádí se, že uvažování v odstínech vyhovuje asijské filosofii oproti evropskému ano/ne. Ale i v Japonsku trvalo dost dlouho, než byly rozpoznány netušené možnosti fuzzy logiky. V devadesátých letech již bylo využití v plném proudu. Jednalo se především o spotřební elektroniku, řízení metra v Sendai (ostrov Honšú, od roku 1987), řízení výtahů atd. Udává se, že Japonsko ovládalo v roce 1991 plných 80% světového trhu s průmyslovými produkty s fuzzy řízením. V západním světě nebylo nasazení fuzzy logiky tak prudké (příkladem využití je zde přistávací modul NASA, cementárna v Dánsku).

V dnešní době je už využití fuzzy logiky velmi pestré. Na trhu můžeme nalézt pračky s fuzzy řízením teploty, množství prací vody a dávkování pracího prostředku podle hmotnosti. Rapidně přibývá aplikací fuzzy logického způsobu řízení kotlů, vytápěcích soustav,

klimatizačních zařízení. Kromě technického světa se fuzzy logika uplatnila i v oborech jako je lékařská diagnostika a při řízení portfolia cenných papírů. [1]

Základním prvkem v řízení je regulátor. Mamdani v roce 1973 řešil problém řízení nelineární soustavy, kdy jej napadla myšlenka aproximovat charakteristiky pomocí fuzzy logiky, konkrétně pomocí fuzzy implikací. Mamdani a spol. zjistili, že stačí jen velmi málo pravidel k úspěšnému řízení a dokonce takovýto regulátor vykazuje lepší dynamické vlastnosti než klasický PI nebo PID regulátor. [2]

Diplomová práce se zaměřuje na vysvětlení fuzzy logiky obecně, popis fuzzy regulátorů, a to hlavně fuzzy regulátorů typu Mamdani a především na vytvoření báze pravidel fuzzy regulátoru. Hlavním cílem diplomové práce je tvorba báze pravidel pomocí expertního systému NTS, výsledné hodnoty a z nich plynoucí závěry.

## 2. Fuzzy logika

Fuzzy logika slouží obecně (na rozdíl od aristotelovské – dvoustavové logiky) k definování stavů, které nemají ostře vymezené hranice. Pro určitou vstupní hodnotu mohou být do jisté míry pravdivé dva i více stavů (teplo je když...), resp. interval stavů.

Fuzzy logika je nadsoubor ke konvenční dvoustavové logice, tedy dvoustavová logika je podmnožinou fuzzy logiky. Soubor funkcí fuzzy logiky je rozšířen o práci s hodnotami pohyblivými se mezi true a false, tj. s částečnou pravdou.

V úzkém slova smyslu je fuzzy logika vícehodinová logika, jejímž cílem je vypracovat model fenoménu vágnosti (příslušnosti). Vágnost tedy určuje, jak moc se proměnná přibližuje k pravdivé hodnotě true. Vágnost může nabývat hodnot od nuly do jedné.

V širším slova smyslu je fuzzy logika teorie dedukce a teorie fuzzy množin, které jsou odvozeny od vícehodnotové logiky. S aplikací těchto teorií se setkáváme u fuzzy regulace, rozpoznávání obrazců, regresní analýzy, expertních systémů a vyhodnocování dotazníků.

Z reálných veličin se k fuzzy hodnotám dostáváme pomocí fuzzyfikace. Fuzzyfikace je metoda generalizování (zobecnování) každé teorie od diskrétní (crisp) ke spojitě (fuzzy) formě. [3]

### 2.1 Fuzzy množiny

#### Základní pojmy teorie fuzzy množin

Zatímco zobecnění pojmu množiny v původním tvaru je těžko představitelné, charakteristickou funkci lze snadno zobecnit na funkci nabývající více (pravdivostních) hodnot. Množinou pravdivostních hodnot je interval nabývající hodnot reálných čísel  $\langle 0,1 \rangle$  nebo jeho podmnožina.

Předpokladem je pevně zvolená univerzální množina  $X$ . Fuzzy podmnožinou  $A$  univerza  $X$  (stručně fuzzy množinou) je rozuměn objekt popsáný charakteristickou funkcí

$$\mu_A : X \rightarrow \langle 0, 1 \rangle \quad (2.1)$$

(nazývanou též funkce příslušnosti). Pro každý prvek  $x \in X$  hodnota  $\mu_A(x) \in \langle 0, 1 \rangle$  říká, do jaké míry je  $x$  prvkem fuzzy množiny  $A$ . Každá funkce z  $X$  do  $\langle 0, 1 \rangle$  určuje jednoznačně nějakou fuzzy množinu. Pokud  $\mu_A = 1$  znamená to, že všechny prvky jednoznačně patří do množiny  $A$ . V opačném případě  $\mu_A = 0$  zcela jistě prvky do množiny  $A$  nepatří. [4]

### Obor hodnot (angl. Range)

$$Range(A) = \{\alpha \in \langle 0, 1 \rangle : (x \in X : \mu_A(x) = \alpha)\} \quad (2.2)$$

### Výška fuzzy množiny (angl. height)

Výškou fuzzy množiny je myšlena maximální hodnota funkce příslušnosti.

$$hgt(A) = \sup Range(A) \quad (2.3)$$

Je-li výška fuzzy množiny  $hgt(A)=1$ , potom se tato množina nazývá *normální*. V případě, že  $hgt(A)=0$  se množina nazývá *subnormální*.

### Šířka fuzzy množiny (angl. width)

$$width(A) = \sup(supp(A)) - \inf(supp(A)) \quad (2.4)$$

Jestliže je nosič fuzzy množiny ohraničený, je možno supremum a infimum nahradit maximem a minimem a šířka fuzzy množiny pak vyjadřuje jejich rozdíl.

### Nosič fuzzy množiny (angl. Support)

Nosič je ostrá množina definovaná jako množina všech prvků univerza  $X$ , které mají kladnou funkci příslušnosti.

$$Supp(A) = \{x \in X : \mu_A(x) > 0\} \quad (2.5)$$

### Jádro fuzzy množiny (angl. Core)

Jádro je definováno jako ostrá množina všech prvků univerza  $X$ , jejichž funkce příslušnosti je rovna 1.

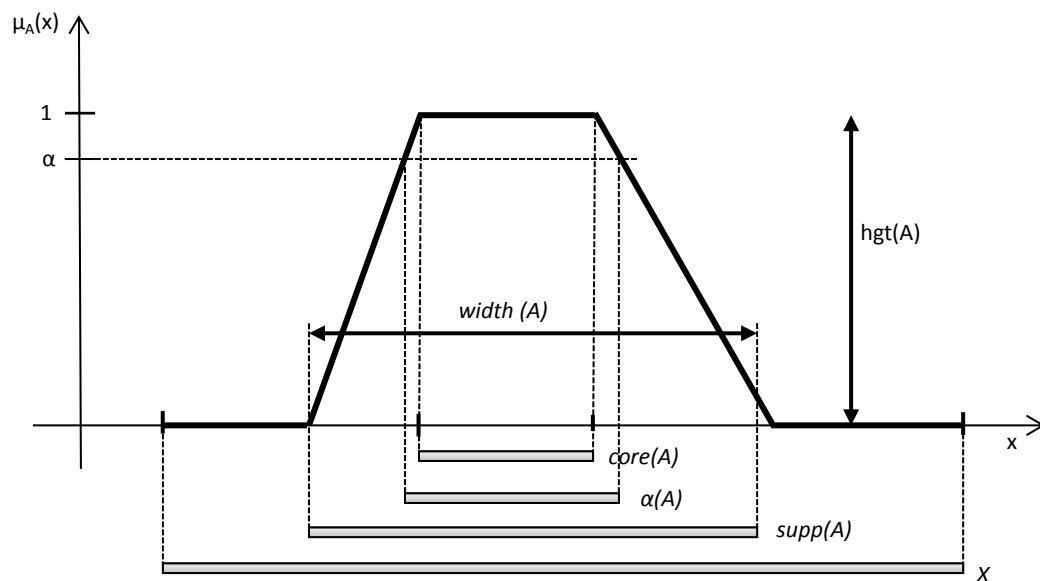
$$\text{core}(A) = \{x \in X : \mu_A(x) = 1\} \quad (2.6)$$

Pokud se v celém univerzu vyskytuje pouze jeden bod, jehož funkce příslušnosti je rovna 1, pak se tento bod nazývá špičková hodnota (angl. peak value).

**$\alpha$ -řez fuzzy množiny (angl.  $\alpha$ -cut)**

$$\alpha(A) = \{x \in X : \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (2.7)$$

Jednotlivé vlastnosti fuzzy množiny znázorňuje následující obrázek



Obr.1 Základní pojmy fuzzy množin

## 2.2 Operace s fuzzy množinami

Fuzzy množiny můžeme pokládat za zobecnění klasických ostrých množin. Ostrá množina může být pokládána za zvláštní případ fuzzy množiny, jejíž funkce příslušnosti nabývá jen hodnot 0 a 1. Fuzzy logika spočívá pouze v rozšíření funkce logických operátorů (AND, OR, NOT) z dvouhodnotové logiky pro vícehodnotovou (fuzzy) logiku. [5]



Zpravidla jsou mezi základní operace počítány pouze sjednocení, průnik a doplněk. Operace součinu se uvádí jako alternativa k průniku. Má však hluboké výsledky ve fuzzy logice, proto je zařazena mezi základní operace fuzzy množin. [6]

Pro fuzzy množiny se stejným univerzem  $X$  jsou definovány tyto základní operace:

- ***Sjednocení***

$$\mu_A(x) + \mu_B(x) = [X, (\mu_A + \mu_B)(x)], \text{ kde } (\mu_A + \mu_B)(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.8)$$

- ***Průnik***

$$\mu_A(x) \times \mu_B(x) = [X, (\mu_A \times \mu_B)(x)], \text{ kde } (\mu_A \times \mu_B)(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.9)$$

- ***Součin (omezený nebo odvážný průnik)***

$$\mu_A(x) \times \mu_B(x) = [X, (\mu_A \times \mu_B)(x)], \text{ kde } (\mu_A \times \mu_B)(x) = \max\{0, [\mu_A(x) + \mu_B(x) - 1]\} \quad (2.10)$$

- ***Doplněk (komplement)***

$$\mu_A(x) = [X, \mu_A(x)], \text{ kde } \mu_A(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.11)$$

Intuitivně lze základní operace zdůvodnit takto: Necht'  $x \in A$  ve stupni  $\mu_A(x)$  a  $x \in B$  ve stupni  $\mu_B(x)$ . Pak  $x$  je prvkem  $A$  nebo  $B$  ve stupni, který musí být alespoň tak velký, jako je větší z obou stupňů  $\mu_A(x), \mu_B(x)$ . Podobně,  $x$  je prvkem  $A$  i  $B$  ve stupni, který nemůže být větší než menší z obou stupňů  $\mu_A(x), \mu_B(x)$ . Obecně je však menší, a to v tom případě, kdy je mezi  $A$  a  $B$  nějaká vnitřní souvislost. Pak používáme místo průniku operaci součinu. Plyne-li z toho, že  $x$  je prvkem  $A$  v nějakém stupni, vždy nepravda, musí být  $x$  alespoň částečně prvkem doplňku  $A$ . Operace doplňku byla zavedena jako analogie operace negace v logice.

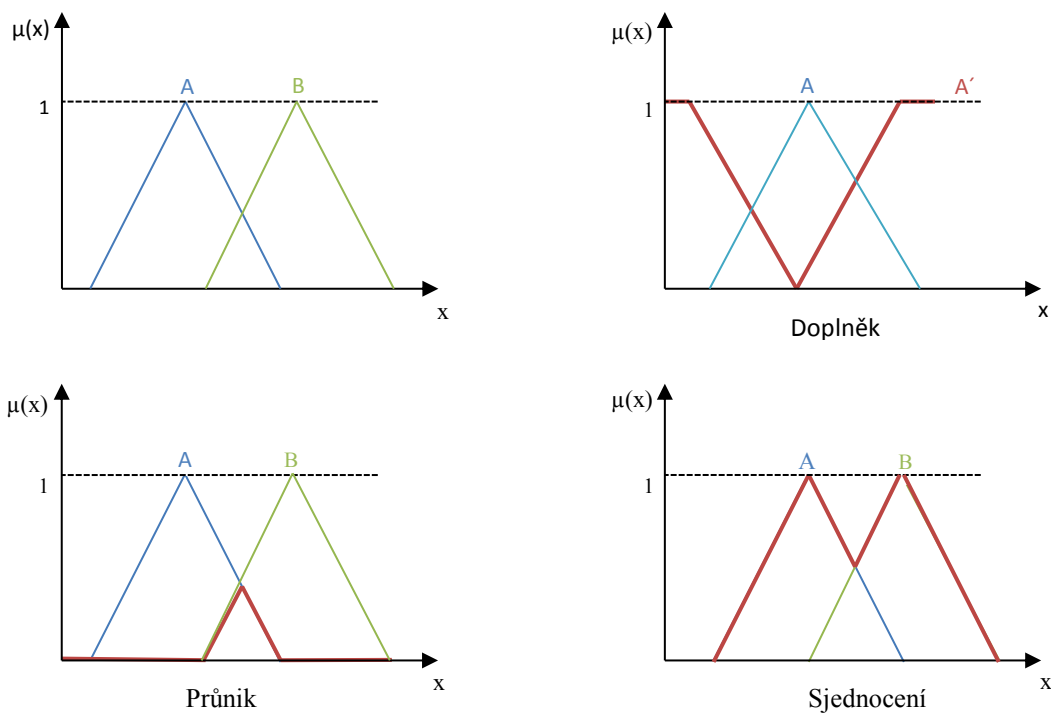
Ne vždy lze ale použít pouze tyto základní vztahy. Proto existují triangulární normy a konormy poskytující obecnější pohled na třídy operací odpovídající průniku a sjednocení. To nám umožňuje v mnohých aplikacích, že nemusíme přesně specifikovat typ použité operace. Můžeme např. říci, že v daném případě můžeme použít jakoukoliv triangulární normu, např. minimum.

Pro fuzzy množiny, definované na různých univerzech, jsou definovány fuzzy množiny, zvané fuzzy relace  $R$ . Pro fuzzy množiny  $\mu_A(x) = [X, \mu_A(x)]$ ,  $\mu_B(y) = [Y, \mu_B(y)]$  s univerzy  $X$  a  $Y$  jsou fuzzy relace definovány na dvojrozměrném univerzu  $(x, y)$ .

Příkladem fuzzy relace je možné uvést nejrozšířenější kartézský součin. Kartézským součinem fuzzy množin  $\mu_A(x) = [X, \mu_A(x)]$ ,  $\mu_B(y) = [Y, \mu_B(y)]$  nazveme fuzzy množinu:

$$\mu_A(x) \times \mu_B(y) = [X \times Y, (\mu_A \times \mu_B)(x, y)], \text{ kde } (\mu_A \times \mu_B)(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (2.12)$$

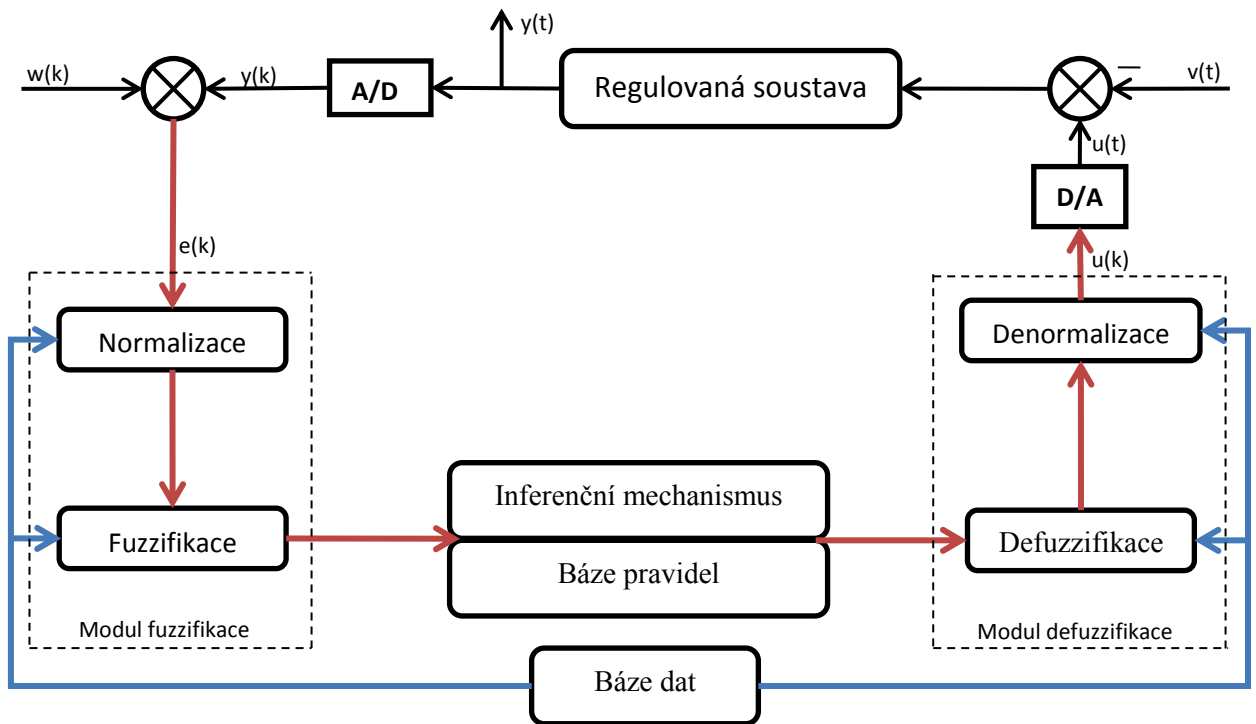
Dalšími fuzzy relacemi jsou např. projekce, cylindrické rozšíření nebo kompozice. [7]



Obr.2 Základní operace s fuzzy množinami

### 3. Fuzzy regulace

Na schématu regulačního obvodu s rozkresleným fuzzy regulátorem na jednotlivé základní bloky bude znázorněno, jak se pracuje s daty při jejich průchodu regulátorem.



Obr.3 Regulační obvod s rozkresleným fuzzy regulátorem

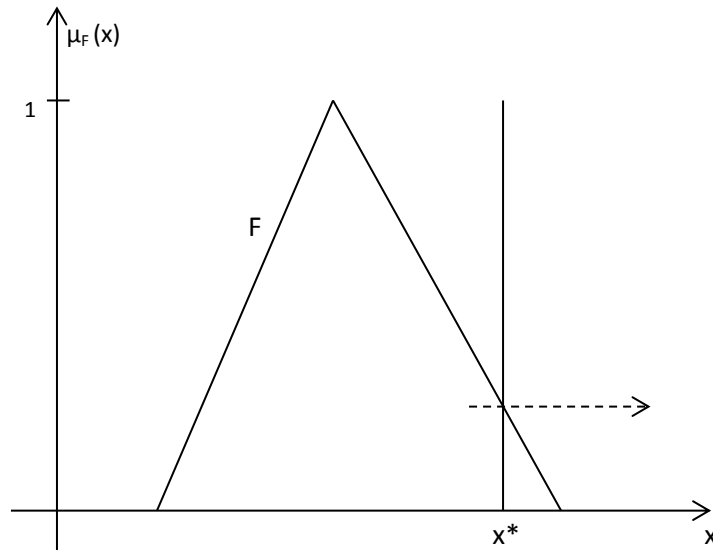
Do procesu vstupují data z informačního systému. Ta jsou různých typů a podob. Proto je potřeba převést jejich hodnoty na fuzzy množiny. Tento převod se děje v tzv. modulu fuzzifikace. Takto upravené hodnoty vstupují do inferenčního mechanismu, který pracuje na znalostní bázi fuzzy řízení. Výsledkem inferenčního mechanismu je fuzzy množina, které pro přímé řízení většinou není použitelná. Převod této výsledné fuzzy množiny na ostré hodnoty, vhodné pro řízení, se děje v modulu defuzzifikace.

## Normalizace

Normalizační blok převádí hodnoty vstupních veličin tak, aby odpovídaly rozsahu vstupních proměnných. Pomocí změny zesílení tohoto bloku je možné změnit chování celého fuzzy regulátoru bez toho, že by se měnila báze dat a báze pravidel.

## Fuzzifikace

Znormalizovaná data pokračují dále do bloku fuzzifikace. Zde dochází k transformaci ostré hodnoty  $x^*$  proměnné  $x$  na fuzzy množinu. Fuzzifikace v podstatě znamená, že měřené veličiny (ostré vstupní veličiny, které mají číselnou hodnotu) se transformují do fuzzy veličin, které se v literatuře uvádí též jako jazykové – lingvistické proměnné. Proces je možné realizovat tak, že výstupní ostré číslo považujeme za fuzzy číslo se speciálním typem funkce příslušnosti, která se nazývá singleton, a toto číslo patří do fuzzy množiny  $F$  s příslušností  $\mu_F(x^*)$ . (12)

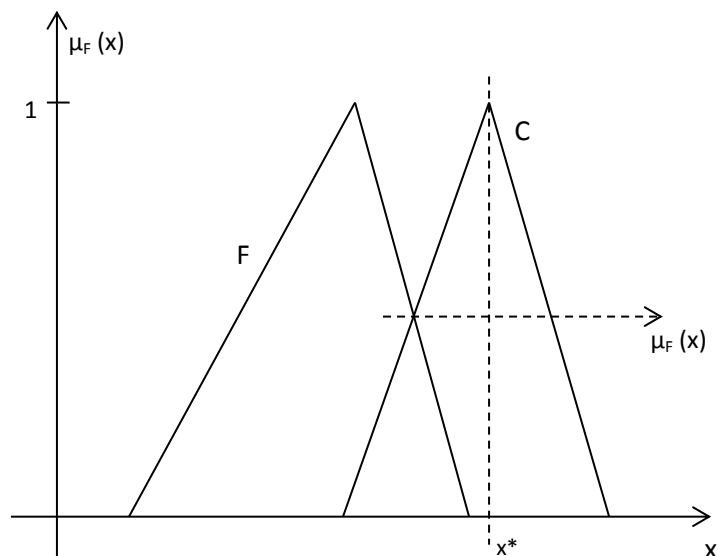


Obr.4 Fuzzyfikace singletonem

Fuzzifikace se tedy provádí na základě vztahu

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x = x^* \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.1)$$

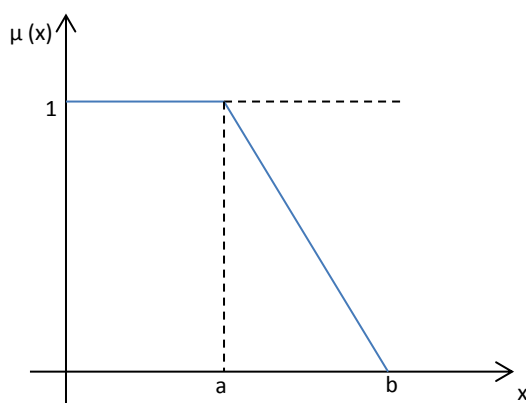
V obecném případě nemusí být vstupující číslo ostré, ale může to být fuzzy číslo vyjádřené fuzzy množinou C (obr.5). Tato fuzzy množina může vyjadřovat např. neurčitost vstupující hodnoty.



Obr.5 Obecný případ fuzzifikace

Pro regulační úlohy se používají standardní tvary funkcí příslušnosti:

- *L-funkce*

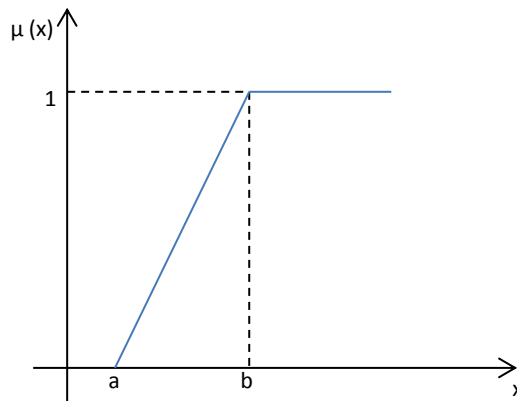


Obr.6 Tvar L-funkce

$$L(x, a, b) = \begin{cases} 1 & x < a \\ (a - x)/(b - a) & a \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (3.2)$$

- $\Gamma$ -funkce

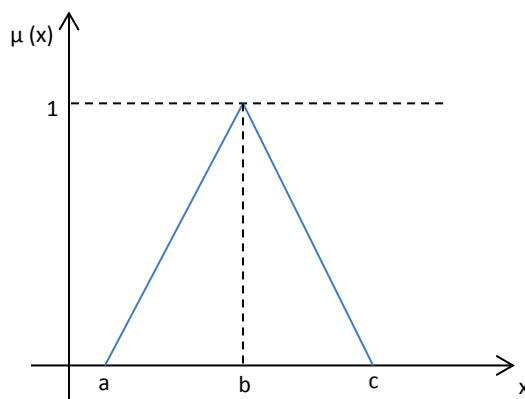
$$\Gamma(x, a, b) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a)/(b - a) & a \leq x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases} \quad (3.3)$$



Obr.7 Tvar  $\Gamma$ -funkce

- $\Lambda$ -funkce

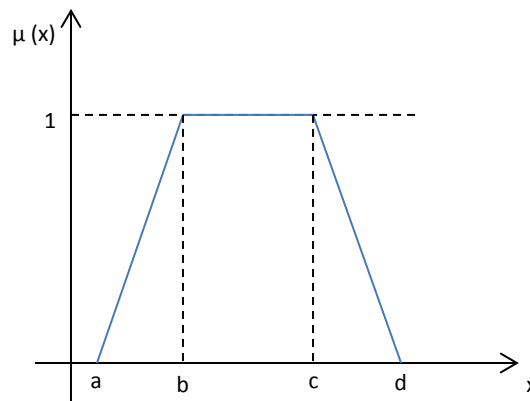
$$\Lambda(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a)/(b - a) & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b) & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (3.4)$$



Obr.8 Tvar  $\Lambda$ -funkce

- $\Pi$ -funkce

$$\Pi(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a)/(b - a) & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ (c - x)/(d - c) & c \leq x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases} \quad (3.5)$$



Obr.9 Tvar  $\Pi$ -funkce

### Inferenční mechanismus

Inferenční mechanismus pracuje nejčastěji s fuzzy výroky vstupního prostoru  $X_i$  a produkuje zase fuzzy výroky nějakého výstupního prostoru  $Y_i$ . Inferenční mechanismus ve fuzzy řízení je nejčastěji vyjádřen jako implikace vstupních fuzzy výroků na výstupní dle pravidla *IF-THEN*, které se též nazývá jako produkční pravidlo. Implikace může pracovat s více vstupními prostory, které odpovídají počtu stavových proměnných použitých k řízení systému, tato implikace je nazývána vícerozměrnou. Jednotlivé fuzzy výroky vstupního prostoru jsou nejčastěji ve vztahu fuzzy průniku: *AND* nebo fuzzy sjednocení: *OR*.

$$IF < antecedent > THEN < konsekvent > \quad (3.6)$$

Kde antecedent je vstupní fuzzy výrok a konsekvent je výstupní fuzzy výrok. [6] [7]



## **Báze dat**

Jednak nese informaci o intervalech, na kterých se pohybují vstupní a výstupní proměnné a také nese definice všech funkcí příslušnosti fuzzy množin na těchto vstupních a výstupních prostorech.

## **Báze pravidel**

Obsahuje strategii řízení získanou nejčastěji popisem lingvistických pravidel dodaných expertem nebo učením báze pravidel z množiny příkladů získanou měřením vstupů a výstupů a jejich převedením na pravidla za použití například metody zpracování vstupně-výstupních párů dat.

## **Defuzzifikace**

Defuzzifikace je strategie, při které je převeden fuzzy výstup z inferenčního mechanismu na ostrou hodnotu výstupu regulátoru. Způsob získání této hodnoty není jednoznačný a existuje mnoho defuzzifikačních metod.

Každá ze strategií dává odlišné výsledky ostré výstupní hodnoty, proto je strategie převážně volena podle druhu aplikace. Formulování požadavků na defuzzifikaci se dá shrnout do následujících bodů: [8]

- Spojitost
- Jednoznačnost obdrženého výsledku
- Výpočetní nároky dané metody
- Výsledná hodnota je požadována zhruba uprostřed množiny konsekventu s co největší hodnotou stupně příslušnosti

## **Příklady defuzzifikačních metod**

### *Metoda středu plochy (těžiště) COA (COG)*

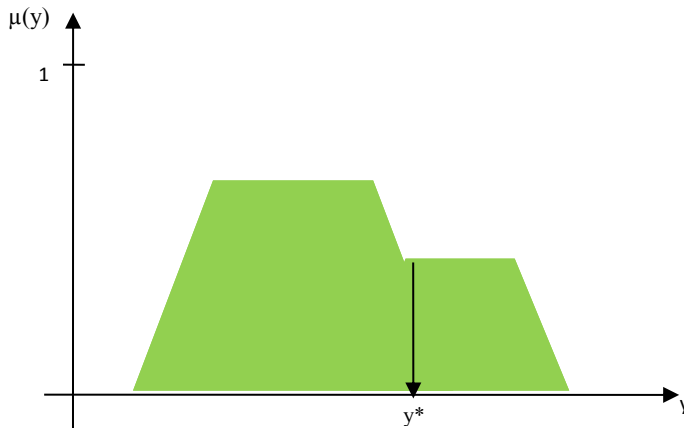
Metoda středu plochy COA (Center of Area) často nazývaná též metoda těžiště COG (Center of Gravity) je v praxi nejpobulárnější metodou. Ostrá hodnota veličiny je určena jako souřadnice těžiště. Pro spojitě a diskrétní univerzum  $Y$  platí pro ostrou hodnotu [10]

$$y^* = \frac{\int_Y \mu_B(y) dy}{\int_Y \mu_B(y) dy} \quad \text{spojitá funkce příslušnosti} \quad (3.7)$$

$$y^* = \frac{\sum_{j=1}^m y_j \times \mu_B(y_j)}{\sum_{j=1}^m \mu_B(y_j)} \quad \text{diskrétní funkce příslušnosti typu singleton} \quad (3.8)$$

Kde:

$\int_Y \mu(y) dy$  je plocha fuzzy množiny



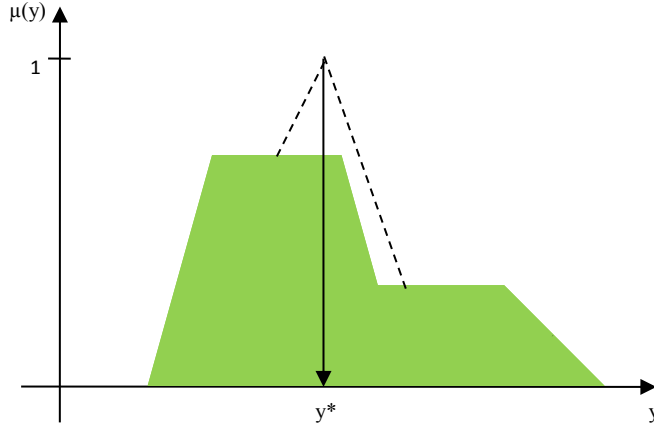
Obr.10 Metoda středu plochy

#### Metoda středu součtů (COS)

Metoda středu součtů COS (Center of Sum) slouží ke zjištění první souřadnice těžiště plochy obrazce, který je ohraničen funkcí danou funkcí příslušnosti  $\mu_B$ . Jedná se o modifikaci předchozí metody. Metoda je rychlá a dobře použitelná. Nevýhodou metody je, že jsou překrývající se oblasti přidány opakovaně. Pro spojitý a diskrétní univerzum  $Y$  je obdrženo pro ostrou hodnotu [11]

$$u^* = \frac{\int_Y y \times \sum_{k=1}^r u_k(y) dy}{\int_Y \sum_{k=1}^r u_k(y) dy} \quad \text{spojitá funkce příslušnosti} \quad (3.9)$$

$$y^* = \frac{\sum_{j=1}^m y_j \times \sum_{k=1}^r \mu_k(y_j)}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r \mu_k(y_j)} \quad \text{diskrétní funkce příslušnosti typu singleton} \quad (3.10)$$



Obr.11 Metoda středu součtů

#### Metoda průměru středů (CAM)

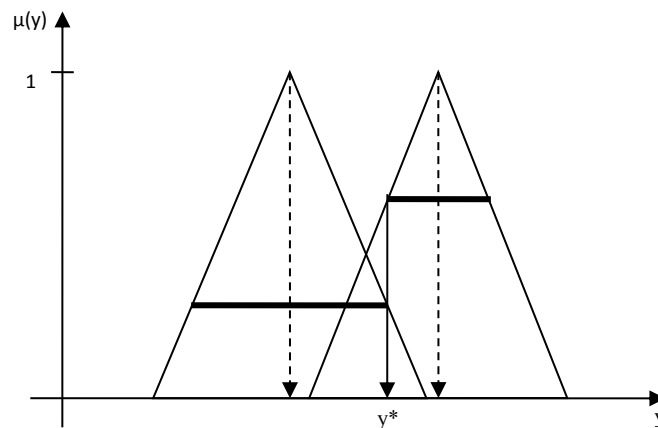
Metoda průměru středů CAM (Centre Average Method) uvažuje špičkové hodnoty (středě) každé fuzzy množiny  $\bar{y}^k$ , které jsou zváženy výškou patřičné fuzzy množiny (hodnotou antecedentu pravidla)  $w^k = hgt(B_o^{(k)})$ , a to pro každé pravidlo  $k = 1, 2, \dots, r$ . Je tedy ostrá hodnota váženým průměrem špičkových hodnot

$$y^* = \frac{\sum_{k=1}^r \bar{y}^k w^k}{\sum_{k=1}^r w^k} \quad (3.11)$$

Kde:

$\bar{y}^k$  je špičková hodnota fuzzy množiny, která se nachází v konsekventu k-tého pravidla

$w^k$  je její výška daná hodnotou antecedentu tohoto pravidla



Obr.12 Metoda průměru středů

### Metody nejvýznamnějšího maxima

U těchto metod hledáme tzv. přijatelné řešení, které vyhovuje podmínkám v rozhodovacích pravidlech. Ze všech termů vybereme term s největší hodnotou funkce příslušnosti a nalezneme maximální hodnotu funkce příslušnosti, která pak svým umístěním v závislosti na zvolené metodě určí ostrou hodnotu výstupní veličiny. [9]

#### Patří sem metody:

- *Left of Maximum (LoM)*

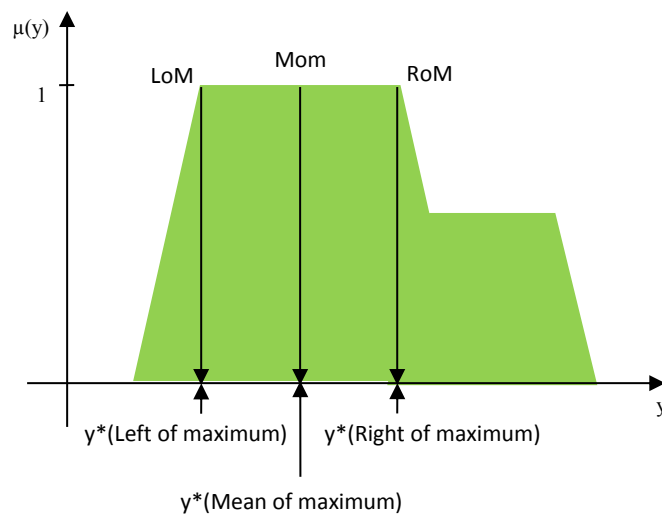
Výsledkem je nejvíce vlevo položená hodnota z největší hodnoty funkce příslušnosti.

- *Mean of Maximum (MoM)*

Výsledkem je ve středu položená hodnota z největší hodnoty funkce příslušnosti.

- *Right of Maximum (RoM)*

Výsledkem je nejvíc vpravo položená hodnota z největší hodnoty funkce příslušnosti.



Obr.13 Metody nejvýznamnějšího maxima

## Denormalizace

Výsledná ostrá hodnota je předána na denormalizaci, která inverzním způsobem k postupu normalizace stanoví pomocí měřítka skutečnou hodnotu řídicí informace pro informační systém.

## 4. Fuzzy regulátory

Ve fuzzy regulaci se objevují stejné typy regulátorů, jako u regulace klasické. Jde o typy P, PI, PD a PID. Fuzzy regulace jde však v rozdělení ještě dál. Jednotlivé regulátory rozeznáváme dále podle použitého inferenčního mechanismu. Jedná se o regulátor typu Mamdani, kterým se bude zabývat diplomová práce a regulátor typu Takagi-Sugeno.

Samotný fuzzy regulátor může být pouze proporcionální, protože lingvistickou aproximací lze aproximovat pouze statickou nikoli dynamickou charakteristiku. Proto u regulátorů s vlastní dynamikou musíme příslušné proměnné (např. derivaci u PD regulátoru) vytvořit mimo vlastní fuzzy regulátor.

Pro zachycení dynamiky je potřeba následujících proměnných:

- **Odchylka:** 
$$e(k) = w(k) - y(k) \quad (4.1)$$

- **Změna odchylky:** 
$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (4.2)$$

- **Součet odchylek:** 
$$\delta e(k) = \sum_{i=1}^k e(i) \quad (4.3)$$

- **Akční zásah:** 
$$u(k)$$

- **Změna akčního zásahu:** 
$$\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1) \quad (4.4)$$

Kde:

$W(k)$ .....žádaná hodnota v kroku  $k$

$Y(k)$ .....regulovaná veličina v kroku  $k$

### Mamdani fuzzy regulátor

Tento regulátor je nejstarším a v současnosti nejrozšířenějším typem fuzzy regulátoru. Mamdaniho model regulátorů je založen hlavně na heuristických znalostech a zkušenostech obsluhy. Pro sestavení toho typu regulátoru není potřeba matematického vyjádření procesu, což je zároveň jeho největší výhoda. [12] [13]

### Takagi-Sugeno fuzzy regulátor

Jde o konvenční regulátor, který se nazývá též Takagi-Sugeno-Kangov (TSK) regulátor. Regulátor vznikl úpravou regulátoru typu Mamdani. Inferenční mechanismus fuzzy regulátoru typu Takagi-Sugeno je tvořen odlišným způsobem než inference typu Mamdani. Jedná se o podmíněná pravidla, ve kterých je hodnota konsekventu (závěru) vyjádřena přesným konstantním nebo lineárním vztahem antecedentových proměnných. [14] [15]

### Rozeznáváme dva typy regulátorů:

- *Nelineární Takagiho-Sugenův regulátor*
- *Lineární Takagiho-Sugenův regulátor s proměnlivými parametry*

TSK typ regulátoru je výhodné použít v případech, kdy není možné přesně určit stav, ve kterém se regulovaná soustava nachází. Při použití regulátoru se minimalizuje výpočtová náročnost pravidel. Odpadá zde problém defuzzifikace.

- Pravidla mají následující tvar

$$IF < vstup\ 1 = x > AND < vstup\ 2 = y > THEN\ z = ax + by + c \quad (4.5)$$

- Výstupní proměnné z jednotlivých pravidel jsou následně zpracovány pomocí váhy  $v$ , kterou lze stanovit na základě funkcí příslušnosti vstupních proměnných. Výstupem inferenčního systému je proměnná vyjádřená jako

$$výstup = \frac{\sum_{i=1}^N v_i z_i}{\sum_{i=1}^N v_i} \quad (4.6)$$

Kde:



$N$  představuje počet pravidel

Na základě vlastností výsledné výstupní proměnné lze zhruba prohlásit, že v místech, kde nedochází k "přeryvu" fuzzy množin vstupních veličin, je průběh výstupní proměnné lineární, přičemž v místech vzájemného překrývání fuzzy množin dochází k plynulému napojení jedné lineární funkce na druhou.

#### 4.1 Základní typy Mamdaniho fuzzy regulátorů

*Fuzzy P regulátor*

- Jde o nejjednodušší typ, který popisuje vztah

$$u(k) = K_R \times e(k) \quad (4.7)$$

Kde:

$K_R$  je zesílení regulátoru

- Jedná se o jednorozměrnou závislost s pravidly typu

$$IF < e(k) = \{hodnota\} > THEN < u(k) = \{hodnota\} > \quad (4.8)$$

Kde:

**hodnota** je symbolické jméno hodnoty jazykově proměnné



Obr.14 Blokové schéma fuzzy P regulátoru

### Fuzzy PI regulátor

- Na výstupu regulátoru pracujeme s derivací akční veličiny

$$u = K_R e(k) + K_I \delta e(k) \quad (4.9)$$

Kde:

$K_R$  je zesílení

$K_I$  je integrační zisk (převratná hodnota integrační časové konstanty).

- Regulátor je často realizován tak, že s pomocí fuzzy systému modelujeme diferenci této rovnice (tj. modelujeme přírůstek akčního zásahu  $\Delta u$ ) a na výstup (po defuzzifikaci, tj. po získání ostré hodnoty  $\Delta u^*$ ) zařadíme sumátor
- Diferenciací rovnice (4.9) obdržíme:

$$\Delta u = K_R \Delta e(k) + K_I e(k) \quad (4.10)$$

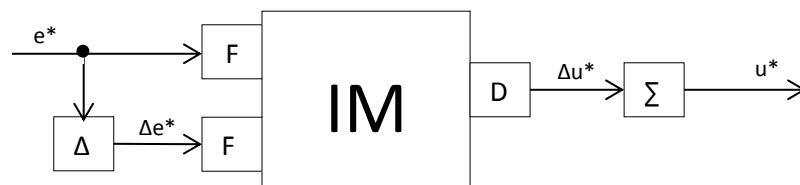
- Pravidla diskrétního PI regulátoru budou mít tvar

$$IF \langle e(k) = \{hodnota\} \rangle AND \langle \Delta e(k) = \{hodnota\} \rangle THEN \langle \Delta u(k) = \{hodnota\} \rangle \quad (4.11)$$

- Na výstupu tohoto regulátoru obdržíme pouze změnu akčního zásahu. Celkový akční zásah pak určíme jako:

$$u(k)^* = u(k-1)^* + \Delta u(k)^* \quad (4.12)$$

- Vztah (4.10) je realizován mimo fuzzy model, a to pomocí sumátoru, takže se v pravidlech neprojeví



Obr.15 Blokové schéma PI regulátoru

### Fuzzy PD regulátor

- Vztah popisující regulátor

$$u(k) = K_R e(k) + K_D \Delta e(k) \quad (4.13)$$

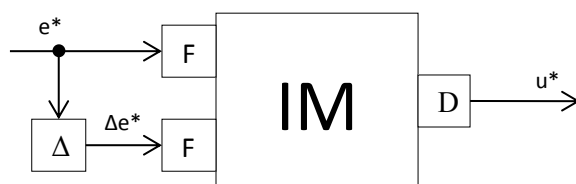
Kde:

$K_R$  je zesílení

$K_D$  je derivační časová konstanta

- Vstupy tohoto regulátoru jsou odchylka a její difference
- Jde o dvourozměrnou závislost s pravidly typu

$$IF < e(k) = \{hodnota\} > AND < \Delta e(k) = \{hodnota\} > THEN < u(k) = \{hodnota\} > \quad (4.14)$$



Obr. 16 Blokové schéma PD regulátoru

Fuzzy PD regulátor má dva vstupy odchylku  $e(k)$  a její první diferenci  $\Delta e(k)$ . Na rozdíl od fuzzy PI regulátoru nemá sumaci akčního zásahu na výstupu. Zatímco u fuzzy PI regulátoru nastavení báze pravidel nezávisí na typu odezvy procesu, u fuzzy PD regulátoru závisí modifikace báze pravidel podle odezvy procesu. Jestliže má proces integrační charakter odezvy na jednotkový vstupní signál (nebo použijeme fuzzy PD regulátor v kombinaci s fuzzy PI regulátorem), není nutné posunout rozsah univerza pro akční zásah  $u \in \langle u_{min}, u_{max} \rangle$ . V opačném případě je nutné si uvědomit, že pro soustavy bez integračního charakteru odezvy musí regulátor v ustáleném stavu dávat akční zásah, jehož velikost závisí na zesílení procesu a žádané hodnotě. Proto musíme upravit rozsah universa pro akční zásah  $u \in \langle 0, u_{max} \rangle$  s ohledem na konkrétní velikost akčního zásahu pro danou žádanou hodnotu a zesílení procesu (tím se ovšem ztratí původní jazykový význam termů v tabulce) nebo změnit bázi pravidel. Navíc velikost akčního zásahu je nepřímo úměrná zesílení systému, což komplikuje výpočet akčního zásahu pro různé žádané hodnoty. Nastavení rozsahu žádaných hodnot je tím omezeno a fuzzy PD regulátor mívá horší dynamiku a větší chybu v ustáleném stavu, než je jeho ekvivalent PD. Působení poruchových veličin rovněž výrazně ovlivňuje přesnost regulačního obvodu v ustáleném stavu.

V mnoha případech je fuzzy PD regulátor nasazen na procesy s integračním charakterem odezvy na skokový vstupní signál. Jeho výhodou může být rychlejší reakce na změny v regulačním obvodu než u fuzzy PI nebo PID regulátoru. Přítomnost poruch působících na proces však není schopen vyregulovat bez chyby. Ve snaze zmenšit chybu je často velmi zvyšováno zesílení regulátoru, což může mít za následek vznik kmitů a malou robustnost regulační odchylky.

### Fuzzy PID regulátor

- Vztah popisující regulátor

$$u = K_R e(k) + K_D \Delta e(k) + K_I \delta e(k) \quad (4.15)$$

Kde:

$K_R$  je zesílení

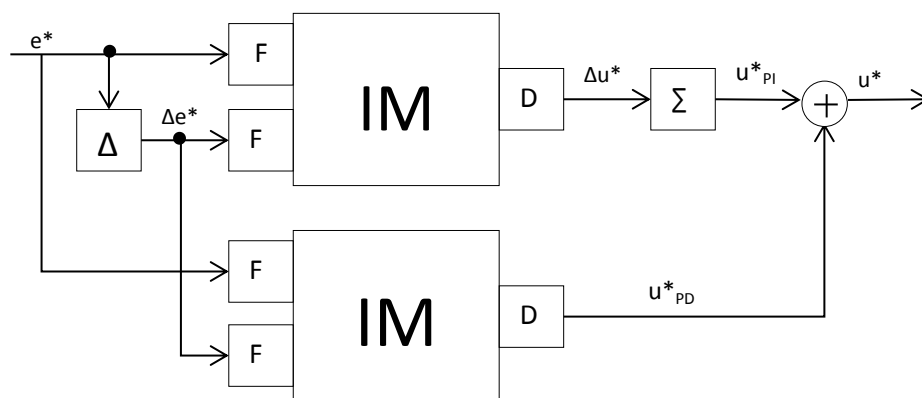
$K_I$  je integrační zisk

$K_D$  je derivační časová konstanta

- Jde o trojrozměrnou závislost s pravidly typu

$$IF \langle e(k) = \{hodnota\} \rangle AND \langle \Delta e(k) = \{hodnota\} \rangle AND \langle \delta e(k) = \{hodnota\} \rangle THEN \langle u(k) = \{hodnota\} \rangle \quad (4.16)$$

- Díky trojrozměrné závislosti je naplnění matice pravidel obtížné, proto se fuzzy PID regulátor zpravidla řeší jako součet paralelně pracujících fuzzy PI a PD regulátorů.



Obr.17 Blokové schéma PID regulátoru

Při seřizování klasických PID regulátorů v reálném procesu se nastavují složky I a D regulátoru zvlášť (příčemž zesílení u proporcionální složky  $K$  je vytknuto) a nikoliv jejich kombinaci, protože každá složka má svůj hluboký fyzikální význam. Proporcionální složka odpovídá přirozené řídicí akci, derivační složka je urychlující a stabilizující, integrační složka potlačuje chybu, ale zároveň zpomaluje systém a zhoršuje stabilitu. Všechna tato tvrzení jsou samozřejmě značně zjednodušená, protože parametry PID regulátoru spolu navzájem spolupracují při tvorbě akčního zásahu. Nejen velký vliv P a I složky může být destabilizující, ale v případě poruch působících v systému může rovněž vliv D složky zhoršovat stabilitu regulačního obvodu.

Obecně lze pomocí fuzzy PID regulátoru realizovat rychlejší přechodové děje než se samotným fuzzy PI regulátorem. Fuzzy regulátor se znalostí výše uvedených faktů je nejlépe sestavit jako kombinaci dvou fuzzy regulátorů PI a PD nebo fuzzy I a PD.

Použití PID regulátoru nejenom zlepšuje průběhy přechodových charakteristik, ale je i nezbytné v případě integračního charakteru soustavy a požadování vyregulování poruchy bez chyby. Samotný fuzzy PI regulátor zde výrazně zpomalí přechodový děj a může dojít i k nestabilitě systému, případně ke stálým oscilacím s malou amplitudou. Aplikace derivačního charakteru regulátoru zde pomůže zrychlit přechodný děj, zajistit stabilitu a eliminovat oscilace. [16]

## **5. Návrh báze pravidel fuzzy regulátoru**

Teoretická část diplomové práce se zabývala obecným popisem fuzzy logiky. Byly definovány základní pojmy používané ve fuzzy logice. Dalším bodem druhé kapitoly je charakteristika fuzzy množin a operace s nimi. Jsou zde zmíněny také jiné možné formy operací s fuzzy množinami. Kapitola Fuzzy regulace je zaměřena na princip fuzzy řízení. Jsou zde popisovány jednotlivé bloky fuzzy regulace a postupný průchod dat regulátorem. Poslední kapitola se zabývá fuzzy regulátory. Jsou zde uvedeny základní výpočty potřebné pro fuzzy regulaci a dále rozčleněny jednotlivé typy regulátorů podle inferenčního mechanismu na dva základní typy, a to regulátory typu Mamdani a regulátory typu Takagi-Sugeno. Následující část se bude zabývat regulátory typu Mamdani, proto jim byly popsány hlouběji v teoretické části a byly ještě dále rozděleny na regulátory typu P, PD, PI a PID.

Následující část práce se zabývá návrhem a tvorbou báze pravidel fuzzy regulátoru. Ta využívá fuzzy množin pro zápis hrubé expertní znalosti o vztazích mezi reálnými proměnnými a lze na ni nahlížet jako na funkci zadanou tabulkou.

## **5.1 Způsoby sestrojení báze pravidel**

Jedním z nich je odvození z dat. V takovém případě je získán popis systému takzvanou cvičnou množinou, z které se postupně odvozuje báze fuzzy pravidel. Nejčastěji se jedná o neuronové sítě, shlukovou analýzu a genetické algoritmy.

Další metodou je expertně sestavená báze fuzzy pravidel. Zde je potřeba nějakého experta (odborníka na danou problematiku), s jehož pomocí jsou nejprve nadefinovány bazické reálné proměnné a k nim se sestrojí odpovídající jazykové proměnné. Následně je na expertovi, aby našel všechny přípustné kombinace termů nezávislých proměnných a jim poté přiřadil jeden term závislé proměnné. Obecně hovoříme o jazykově orientovaném fuzzy expertním systému.

### **Volba báze pravidel**

Pro tvorbu báze pravidel je možné zvolit dva přístupy. Buď jsou pravidla volena na základě zkušeností experta s daným regulačním problémem anebo lze využít doporučených šablon. Oba přístupy se mohou kombinovat.

Při návrhu pravidel pro typické regulátory P, PI, PD, PID je vhodné postupovat podle doporučených metapravidel a jejich pomocí příslušná pravidla odvodit:

- Jestliže je regulační odchylka  $e(k)$  a její změna  $\Delta e(k)$  nulová nebo blízká nule, potom by měl být přírůstek akční veličiny  $\Delta u(k)$  nulový nebo blízký nule.
- Jestliže regulační odchylka  $e(k)$  klesá k nule, nebo se blíží nule s dostatečnou rychlostí, pak je vhodné neměnit akční veličinu.
- Jestliže se regulační odchylka  $e(k)$  nekoriguje sama, potom je třeba akční veličinu změnit a akční zásah  $\Delta u(k)$  bude nenulový. Jeho velikost a znaménko závisí na znaménku a velikosti regulační odchylky  $e(k)$  a její změny  $\Delta e(k)$ .



		$\Delta e$						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
	Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Obr.18 Doporučená báze pravidel pro fuzzy PI a PD regulátor

**Nultá skupina (modrá pole)**

Obsahuje pravidla, ve kterých je jak odchylka  $e(k)$ , tak i její změna  $\Delta e(k)$  buď nulová nebo velmi malá, ať už kladná nebo záporná. Skutečná hodnota se pohybuje v blízkosti žádané hodnoty a změny akční veličiny jsou minimální. Tato skupina pravidel tedy řeší ustálený stav.

**První skupina (zelená pole)**

Zde je odchylka záporná (buď střední, nebo velká) a její změna je kladná. To znamená, že skutečná hodnota se pohybuje směrem k žádané hodnotě. Velikost změny akčního zásahu je pak úměrná velikosti rychlosti tohoto pohybu.

**Druhá skupina (žlutá pole)**

Odchylka se pohybuje kolem nuly nebo je velká kladná, ale její změna je kladná. To znamená, že skutečná hodnota se vzdaluje od žádané. Je tedy třeba větší změny ve velikosti akčního zásahu než v předchozím případě.

**Třetí skupina (červená pole)**

Tady je odchylka kladná, a to buď střední, nebo velká. Je tedy skutečná hodnota vzdálena od žádané, ale derivace odchylky je záporná, což znamená, že skutečná hodnota se pohybuje směrem k žádané hodnotě, a tedy změna akčního zásahu nebude tak razantní jako v předchozím případě. Tato skupina pravidel je zrcadlovou skupinou ke skupině číslo jedna.

**Čtvrtá skupina (šedá pole)**

V této skupině pravidel se odchylka pohybuje buď v blízkosti nuly, nebo je velká záporná a její změna kladná, tj. skutečná hodnota se pohybuje směrem od žádané hodnoty. Změna akčního zásahu musí být razantnější než v předchozím případě. Tato skupina je zrcadlovým obrazem skupiny číslo dvě.

Pro diplomovou práci byla vybrána druhá metoda. Báze pravidel byla tedy sestrojena pomocí fuzzy expertního systému NTS. Systém se skládá ze tří částí. V první části byly nadefinovány vstupní proměnné, a to odchylka  $e$ , kterou je potřeba před zapsáním normalizovat a derivace odchylky  $de$ , která se stejně jako odchylka, musí znormalizovat. Typ proměnné bylo zvoleno *číslo desetinné*, a to z toho důvodu, že univerzum bylo nastaveno v rozsahu  $\langle -1, 1 \rangle$ . Dále byla nastavena akční veličina jako výstupní proměnná, kde typem bylo opět zvoleno *číslo desetinné*. Model regulované soustavy byl vytvořen v programu Excel. Ke vstupním a výstupním proměnným byly přiřazeny lingvistické hodnoty tzv. termy, kterých jazykové proměnné ( $e(k)$ ,  $\Delta e(k)$ ,  $\Delta u(k)$ ) mohou nabývat. Při nastavování expertního systému byly zvoleny následující množiny termů  $\{ZV, ZS, Z, N, K, KS, KV\}$  a  $\{Z, N, K\}$ , kde jednotlivé symboly znamenají velikost hodnoty, kterou jazyková proměnná nabývá.

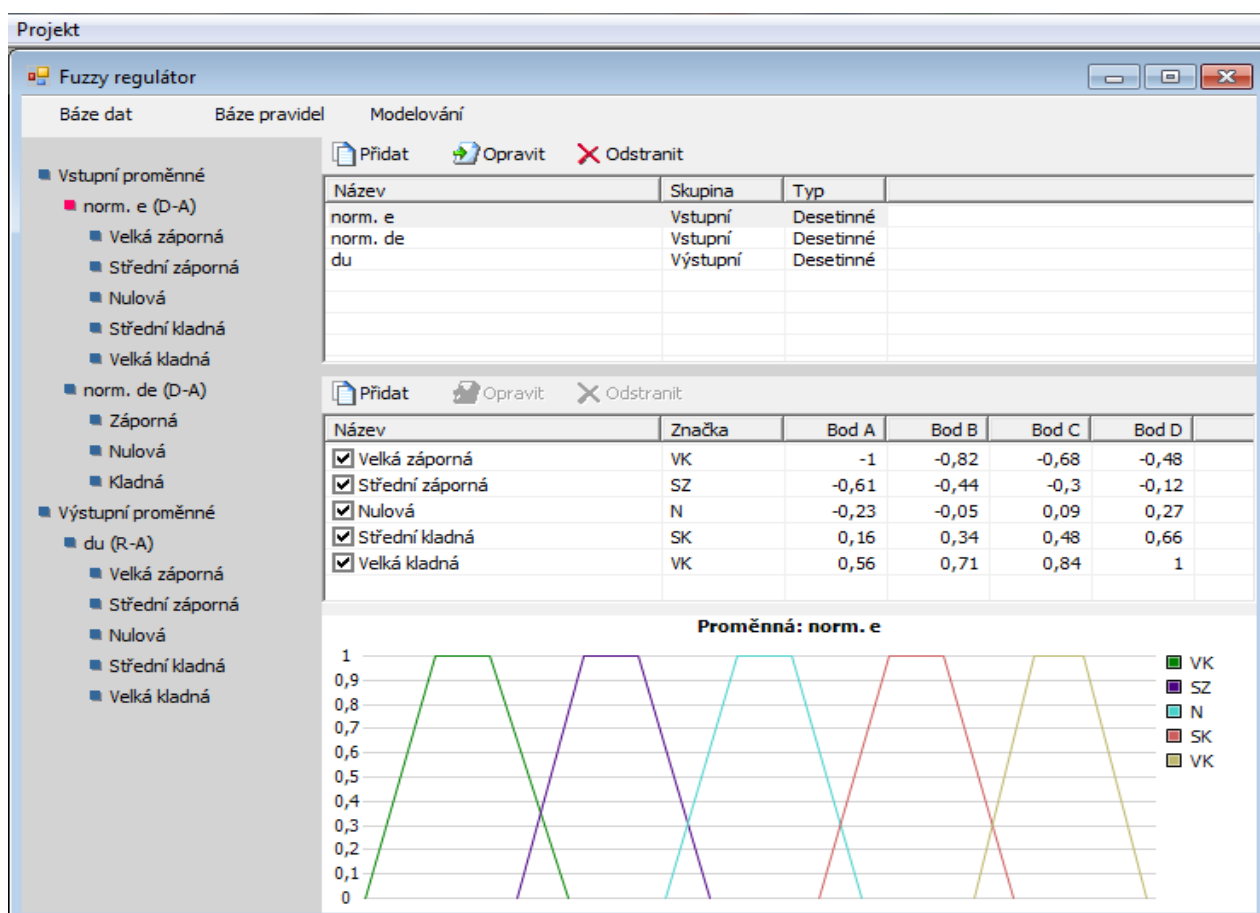
Český název	Anglický název	Zkratka (CZ/ENG)	Český název	Anglický název	Zkratka (CZ/ENG)
Záporná	Negative	Z / N	Kladná	Positive	K / P
Velká záporná	Negative big	VK / NB	Velká kladná	Positive big	VK / PB
Střední záporná	Negative medium	SZ / NM	Střední kladná	Positive medium	SK / PM
Nulová	Zero	N / Z			

Obr.19 Označení lingvistických proměnných hodnot

Jednotlivá označení jsou používána pro všechny tři jazykové proměnné ( $e(k)$ ,  $\Delta e(k)$ ,  $\Delta u(k)$ ).

**5.2 Tvorba báze pravidel v expertním systému NTS**

Rozložení jednotlivých termů bylo nastaveno pomocí čtyř bodů A-D, přičemž ve spodní části okna expertního programu jsou polohy termů znázorněny graficky. Body A-D jsou tedy souřadnicemi každé lingvistické hodnoty.



Obr. 20 Expertní systém NTS

Dalším krokem při tvorbě báze pravidel je samotné nastavování pravidel. Po stisknutí tlačítka *NAPLNIT DATY* se automaticky zobrazí všechny lingvistické hodnoty normalizované odchylky a stejně tak všechny lingvistické hodnoty normalizované derivace odchylky, které byly nastaveny v předchozím kroku. Hodnoty akční veličiny zobrazené ve třetím sloupci se nastavují dle předem určených pravidel ručně. Báze pravidel obsahuje patnáct kombinací pravidel. Vychází z předem sestavené matice, která obsahuje pět termů pro normalizovanou odchylku a tři termy pro normalizovanou změnu odchylky. Výstupní akční veličina obsahuje stejné lingvistické hodnoty jako regulační odchylka. Matice termů může vypadat následovně:

		$\Delta e$		
		Z	N	K
e	VZ	VZ	SZ	SZ
	SZ	VZ	N	N
	N	SZ	N	SK
	SK	N	N	VK
	VK	SK	SK	VK

Obr. 21 Příklad báze pravidel

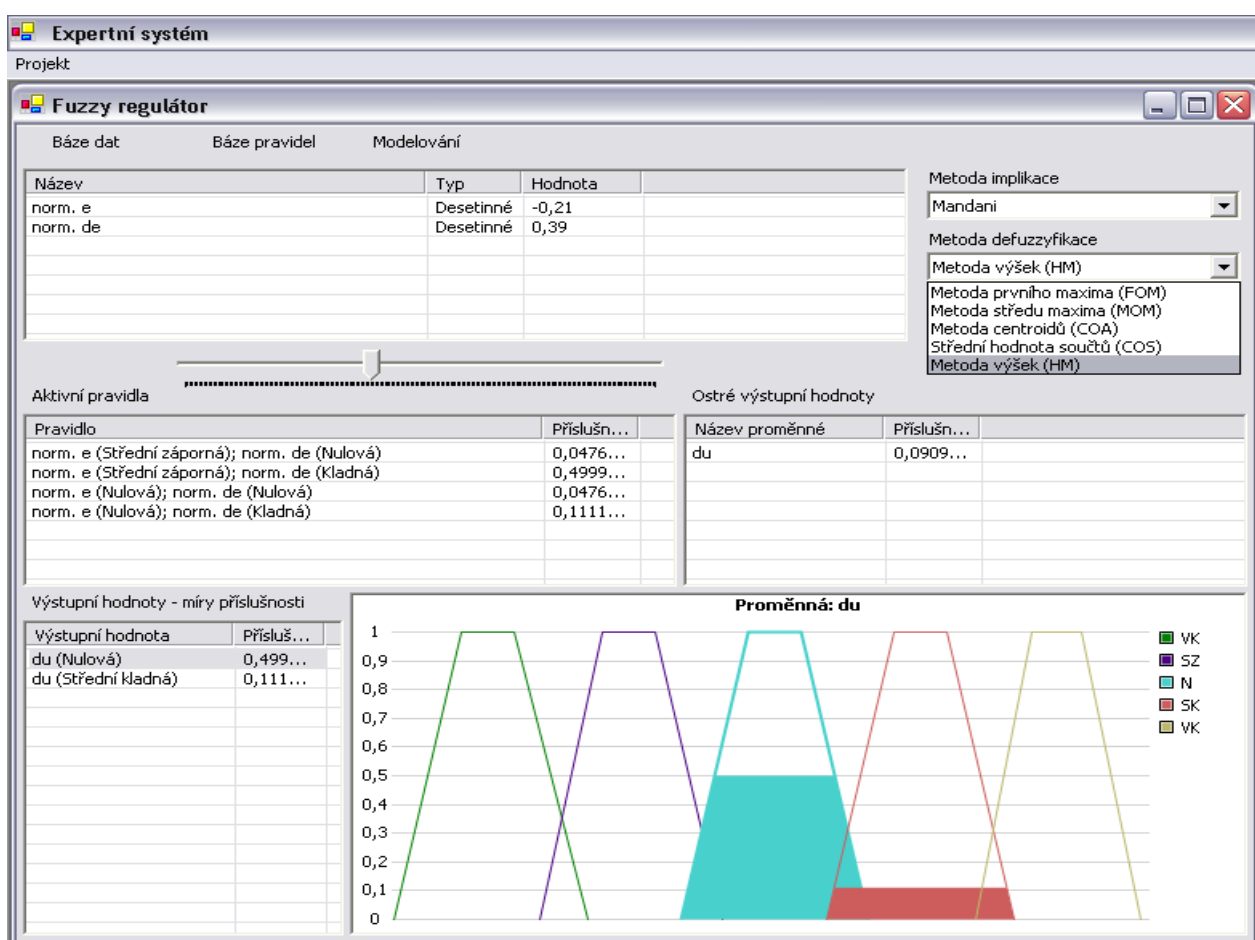
Báze dat	Báze pravidel	Modelování
norm. e	norm. de	du
<input checked="" type="checkbox"/> Velká záporná	Záporná	Střední záporná
<input checked="" type="checkbox"/> Velká záporná	Nulová	Střední záporná
<input checked="" type="checkbox"/> Velká záporná	Kladná	Nulová
<input checked="" type="checkbox"/> Střední záporná	Záporná	Velká záporná
<input checked="" type="checkbox"/> Střední záporná	Nulová	Střední záporná
<input checked="" type="checkbox"/> Střední záporná	Kladná	Nulová
<input checked="" type="checkbox"/> Nulová	Záporná	Nulová
<input checked="" type="checkbox"/> Nulová	Nulová	Nulová
<input checked="" type="checkbox"/> Nulová	Kladná	Nulová
<input checked="" type="checkbox"/> Střední kladná	Záporná	Nulová
<input checked="" type="checkbox"/> Střední kladná	Nulová	Střední kladná
<input checked="" type="checkbox"/> Střední kladná	Kladná	Velká kladná
<input checked="" type="checkbox"/> Velká kladná	Záporná	Nulová
<input checked="" type="checkbox"/> Velká kladná	Nulová	Střední kladná
<input checked="" type="checkbox"/> Velká kladná	Kladná	Střední kladná

Naplnit daty Bu

Obr.22 Expertní systém NTS

Samotné výstupy pravidel a jejich grafická podoba je znázorněna v okně *MODELOVÁNÍ*. Odchylce a změně odchylky jsou zde přiřazovány hodnoty, které se vypočítávají v programu EXCEL a obecné výpočty jsou uvedeny v kapitole 4. V okně *METODA IMPLIKACE* je zvolena metoda, kterou je určena výstupní fuzzy množina. Zde byla zvolena Mamdaniho implikace, jelikož ta je řešena v teoretické části. Dále může být vybrána Larsenova implikace, tou se ale diplomová práce nezabývá, proto nebude více rozebírána. Okno *MODELOVÁNÍ*

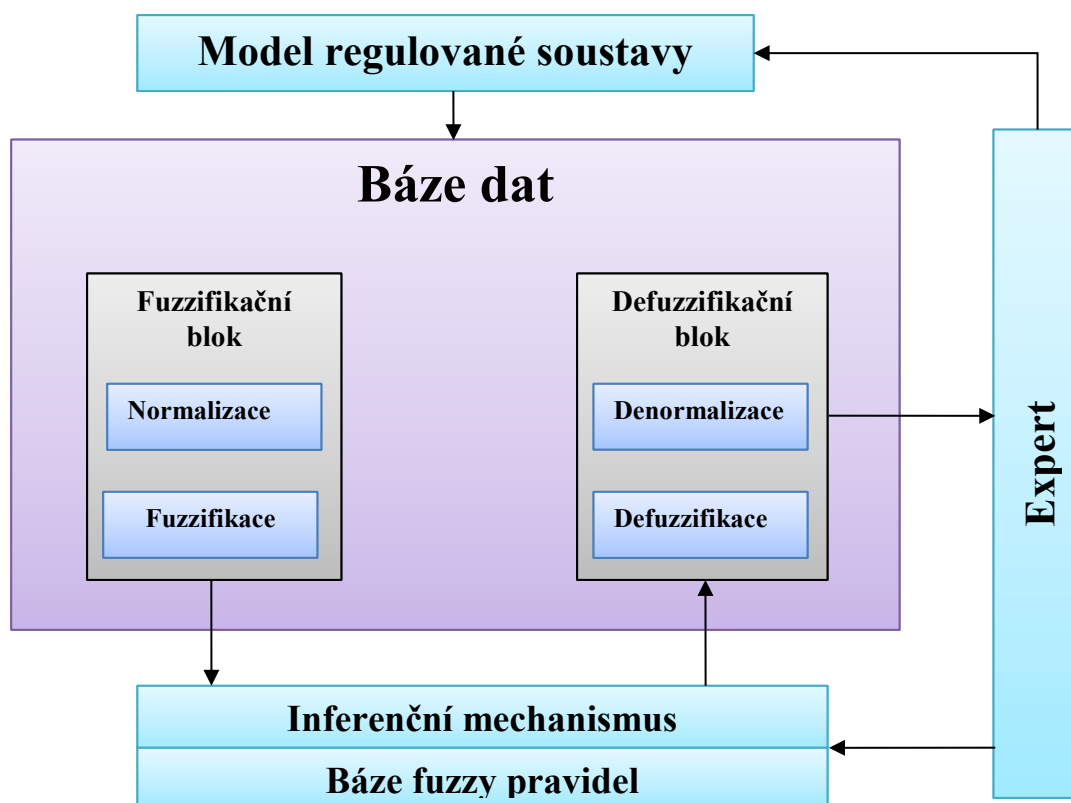
zahrnuje také výběr defuzzifikačních metod. Je zde na výběr pět nejobvyklejších metod, z čehož pro účely diplomové práce byla vybrána metoda výšek. Pro lepší názornost výsledků fuzzifikace je možné sledovat aktivní pravidla v levé části okna a míru příslušnosti ostré výstupní hodnoty akční veličiny v pravé části okna. Použitý expertní systém NTS je poměrně uživatelsky jednoduchý a přehledný pro tvorbu báze pravidel. Změna pravidel není nijak složitá. Jednotlivé kombinace vstupů jsou automaticky vygenerovány expertním systémem na základě zadaných vstupních proměnných. Uživatelem jsou tedy pouze doplňovány výstupy těchto kombinací antecedentů, což urychluje fázi ladění pravidel.



Obr.23 Expertní systém NTS

### 5.3 Ladění báze pravidel

V kapitole 5.2 byla popsána tvorba báze pravidel pomocí expertního systému NTS. Na obrázcích č. 20, 22 a 23 jsou předvedeny jednotlivé kroky tvorby pravidel. Následující schéma ilustruje celý proces tvorby báze pravidel, včetně korigujících zásahů.



Obr.24 Schéma expertního systému NTS

Model regulované soustavy byl vytvořen v programu Excel. V tomto programu byly nastaveny základní parametry soustavy, a to žádaná hodnota regulované veličiny ( $w$ ), zesílení soustavy ( $k$ ) a časová konstanta ( $T$ ). Dané parametry byly dány pro všechny typy regulátorů stejné. Vybraná soustava, na které se testovaly jednotlivé typy regulátorů, měla tvar:

$$y = \frac{K}{T_p s + 1} \quad (5.1)$$

Jednalo se tedy o proporcionální soustavu 1. řádu. Dále se pomocí rovnic uvedených v kapitole 4 vypočítávaly vstupní veličiny (regulační odchylka ( $e$ ), změna regulační odchylky ( $\Delta e$ )). Výstupem z expertního systému byla akční veličina (fuzzy  $u$ ) v případě PD regulátoru a změna akční veličiny (fuzzy  $\Delta u$ ) v případě PI regulátoru. Normalizace a denormalizace regulační odchylky a akční veličiny proběhla ve zvoleném intervalu  $\langle K-50\%, K+50\% \rangle$ . Tento blok byl přiváděn na vstup expertního systému, který pomocí již nastavené báze pravidel vyhodnocoval výsledky. Výsledné hodnoty byly postupně zadávány opět do modelu

regulované soustavy. Pro větší názornost byly výstupní hodnoty zakreslovány do grafů, které budou popsány níže.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	w	1,5									
2	K	2		max. h.	3						
3	T	1									
4											
5	t	y	e	e norm.	de	de norm.	změna du	PD	PI	součet	du denorm.
6				0		0				0	0
7	0	0	1,5	0,5	1,5	0,5	0,365	0,02	0,365	0,385	1,155
8	0,5	1,369885	0,130115	0,043372	-1,36988	-0,45663	0,365	0,02	0,73	0,75	2,25
9	1	1,789202	-0,2892	-0,0964	-0,41932	-0,13977	-0,2	0,02	0,53	0,55	1,65
10	1,5	1,6159	-0,1159	-0,03863	0,173301	0,057767	-0,099	0,02	0,431	0,451	1,353
11	2	1,483073	0,016927	0,005642	0,132828	0,044276	0,012	0,02	0,443	0,463	1,389
12	2,5	1,501351	-0,00135	-0,00045	-0,01828	-0,00609	0,04	0,02	0,483	0,503	1,509
13	3	1,557738	-0,05774	-0,01925	-0,05639	-0,0188	0	0,02	0,483	0,503	1,509
14	3,5	1,557738	-0,05774	-0,01925	0	0	-0,016	0,02	0,467	0,487	1,461
15	4	1,535992	-0,03599	-0,012	0,021746	0,007249	-0,016	0,02	0,451	0,471	1,413
16	4,5	1,513176	-0,01318	-0,00439	0,022816	0,007605	-0,002	0,02	0,449	0,469	1,407
17	5	1,510246	-0,01025	-0,00342	0,00293	0,000977	0,006	0,02	0,455	0,475	1,425
18	5,5	1,518983	-0,01898	-0,00633	-0,00874	-0,00291	0,002	0,02	0,457	0,477	1,431
19	6	1,521861	-0,02186	-0,00729	-0,00288	-0,00096	-0,002	0,02	0,455	0,475	1,425
20	6,5	1,518983	-0,01898	-0,00633	0,002877	0,000959	-0,003	0,02	0,452	0,472	1,416
21	7	1,514634	-0,01463	-0,00488	0,004349	0,00145	-0,002	0,02	0,45	0,47	1,41
22	7,5	1,511713	-0,01171	-0,0039	0,002921	0,000974	0,002	0,02	0,452	0,472	1,416
23	8	1,514634	-0,01463	-0,00488	-0,00292	-0,00097	0	0,02	0,452	0,472	1,416
24	8,5	1,514634	-0,01463	-0,00488	0	0	0	0,02	0,452	0,472	1,416
25	9	1,514634	-0,01463	-0,00488	0	0	0	0,02	0,452	0,472	1,416

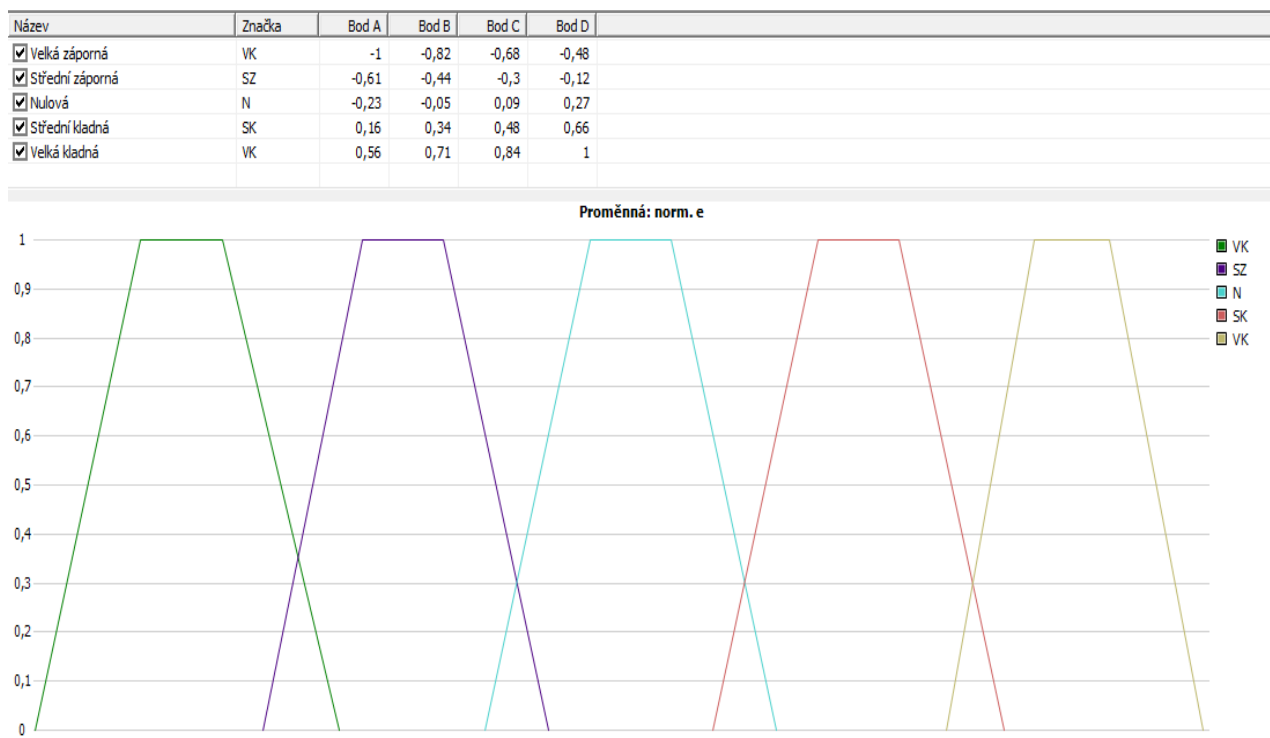
Obr. 25 Model regulované soustavy PID regulátoru

Obrázek č. 25 ilustruje ukázkou modelu regulované soustavy. Konkrétně jde o model regulované soustavy pro PI regulátor. Ve sloupci B (1-3) jsou číselné parametry dané soustavy. Pomocí pole E2 probíhala normalizace regulační odchylky (e) a denormalizace změny akční veličiny ( $\Delta u$ ) v již zmíněném rozsahu. Sloupce zvýrazněné žlutou barvou prezentují vstupní veličiny do expertního systému, sloupec označený zelenou barvou představuje výstupní veličinu z expertního systému.

## 5.5 Srovnáníází pravidel

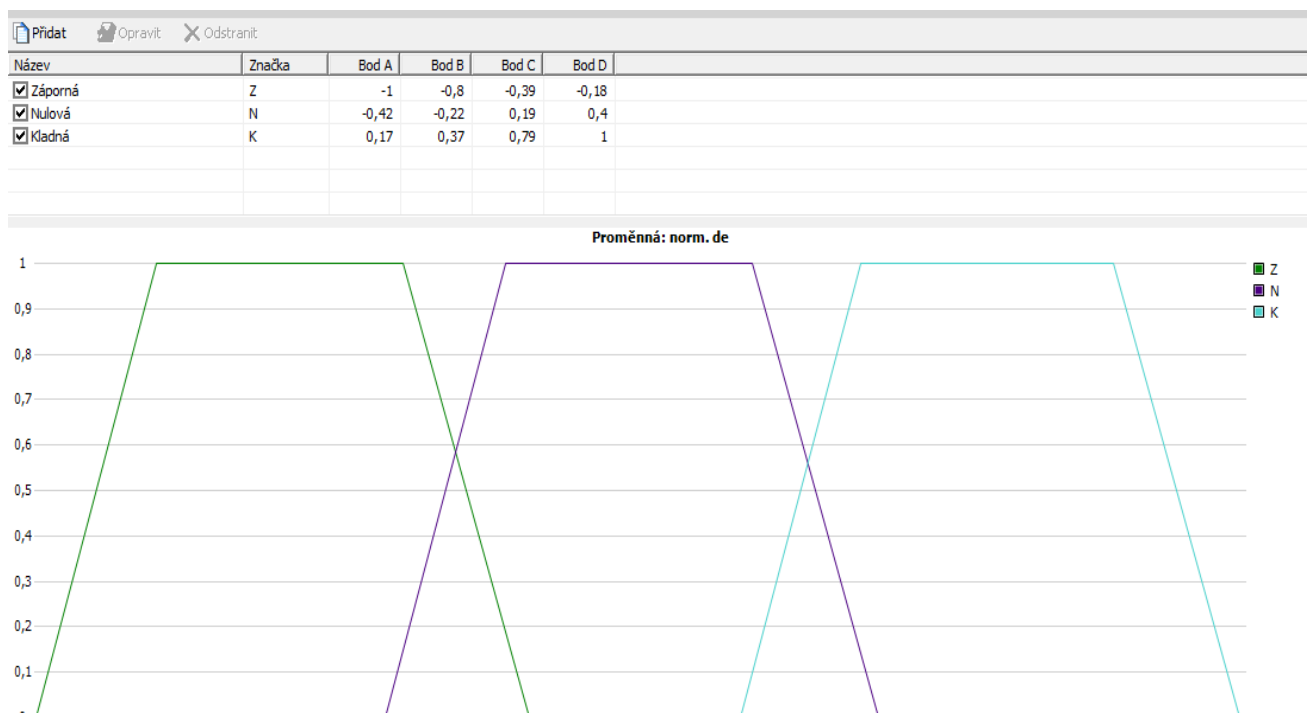
Aplikace různýchází pravidel testovaly danou proporcionální soustavu ve třech typech regulátorů, šlo o typ PI, PD a PID. V kapitole 4, která se zabývá právě typy regulátorů, jsou nastíněna schémata pro každý typ regulátoru. Je z nich patrné, že každý regulátor má jiný tvar výstupní veličiny. Z tohoto důvodu bylo nutné vytvořit pro každý typ jedinečný model regulované soustavy. Zároveň zkompileované báze pravidel nebyly stejné pro řešené druhy regulátorů.

Na obrázcích č. 26 - 32 jsou zachyceny nadefinované rozsahy funkcí příslušnosti pro jednotlivé vstupní proměnné a výstupní proměnné. Pro regulátory typu PI a PD byly rozsahy funkcí nastaveny ve stejných intervalech. Tedy rozsah vstupních veličin PI regulátoru odpovídá rozsahům vstupních veličiny PD regulátoru (obr. č 26 a č. 27). Pro výstupní veličiny platí stejný princip (Obr. č. 28 a č. 29). Výjimku tvoří PID regulátor, kde bylo potřeba intervaly mezi množinami podstatně zúžit (Obr. č. 30, č. 31 a č. 32). Důvodem byla potřeba docílit citlivější odezvy regulátoru na danou bázi pravidel. Toto platí pouze pro PI část báze pravidel. Část PD je shodná s předchozími intervaly řešených regulátorů. Obrázky č. 33 – 53 zobrazují báze pravidel pro jednotlivé typy regulátorů a závislosti regulovaných veličin v čase, které jsou znázorněny v grafech.

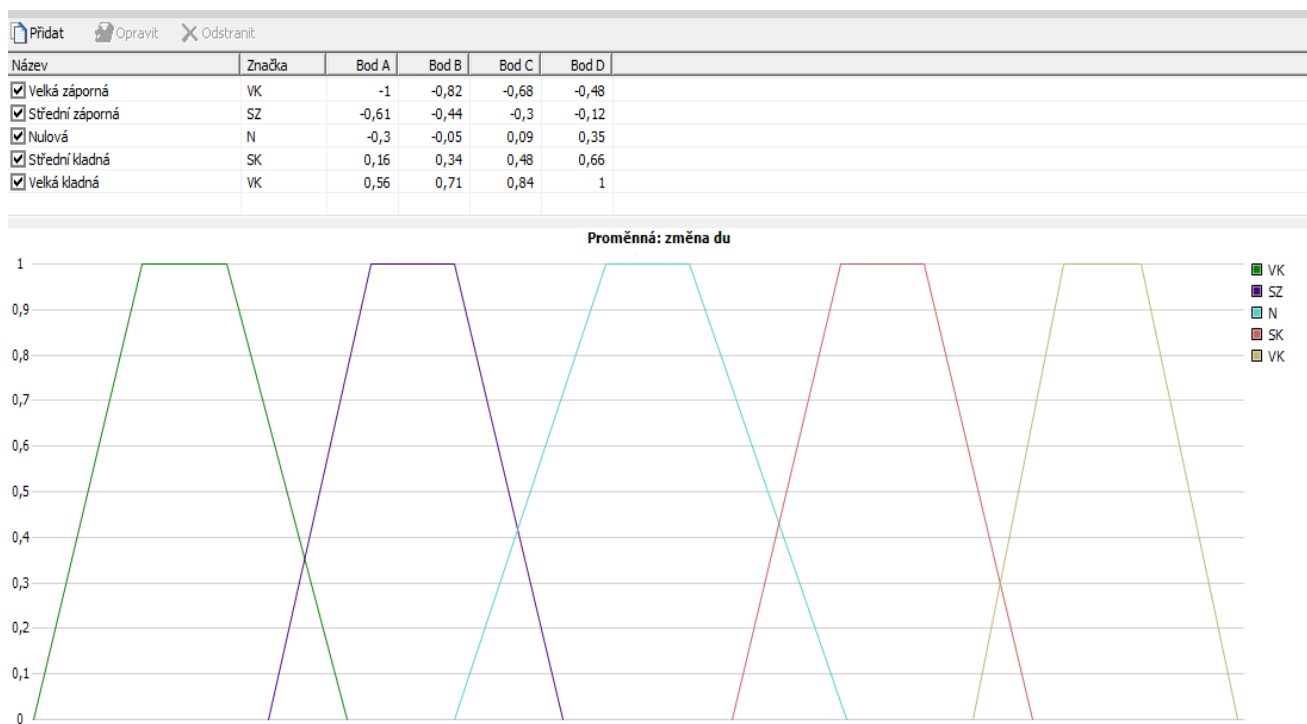


Obr.26 Rozsahy funkcí příslušnosti pro vstupní proměnnou  $e$  normalizované

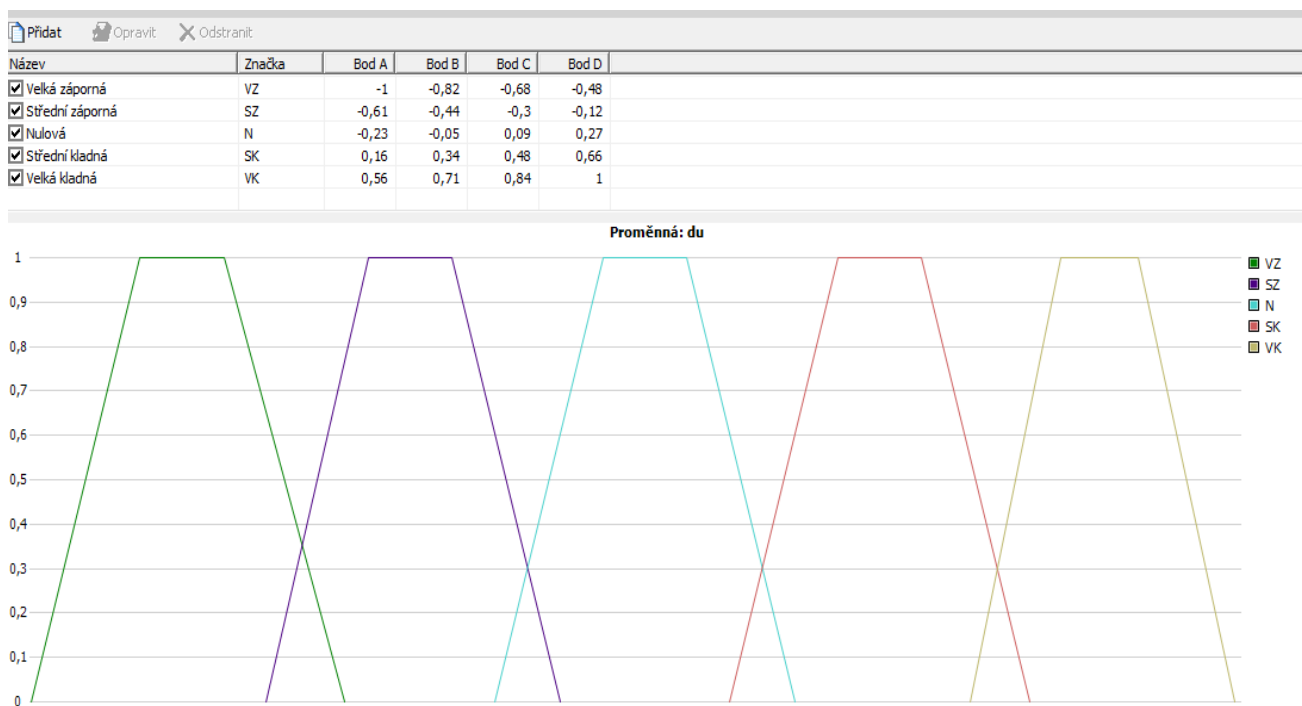




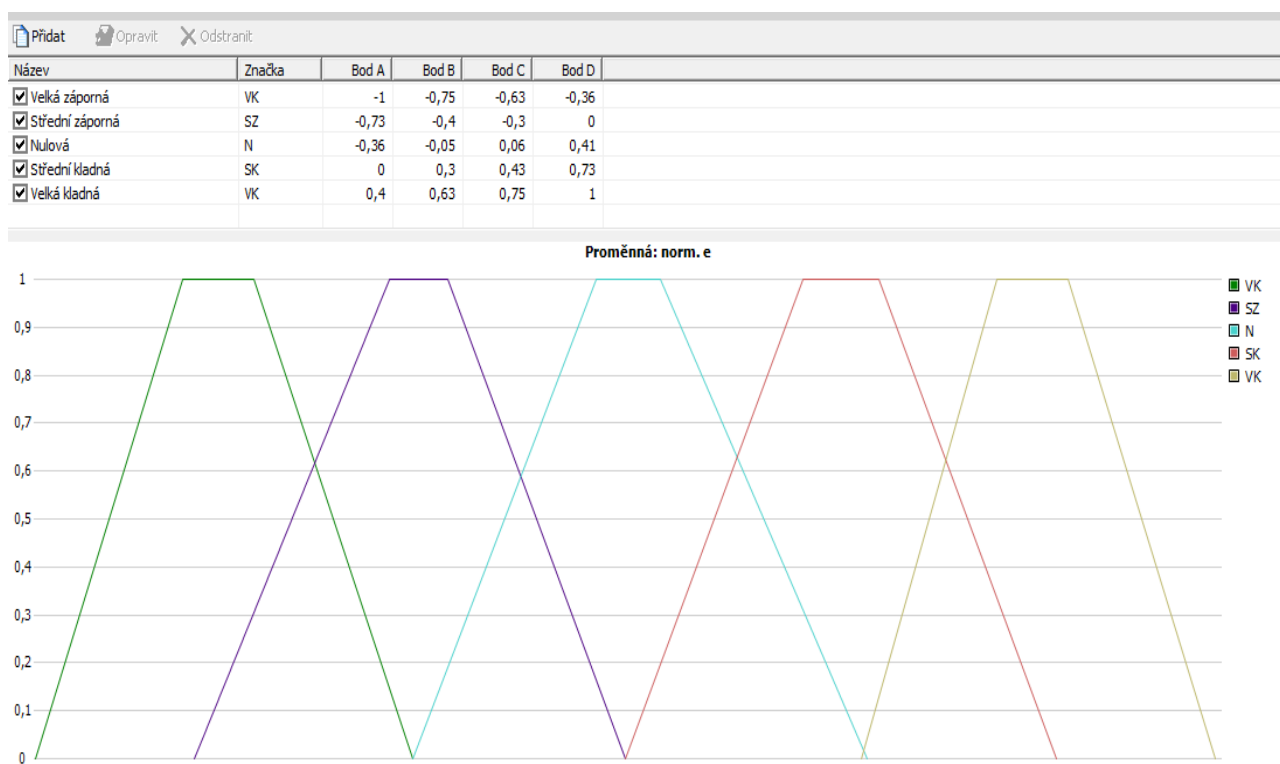
Obr.27 Rozsahy funkcí příslušnosti pro vstupní proměnnou  $\Delta e$  normalizované



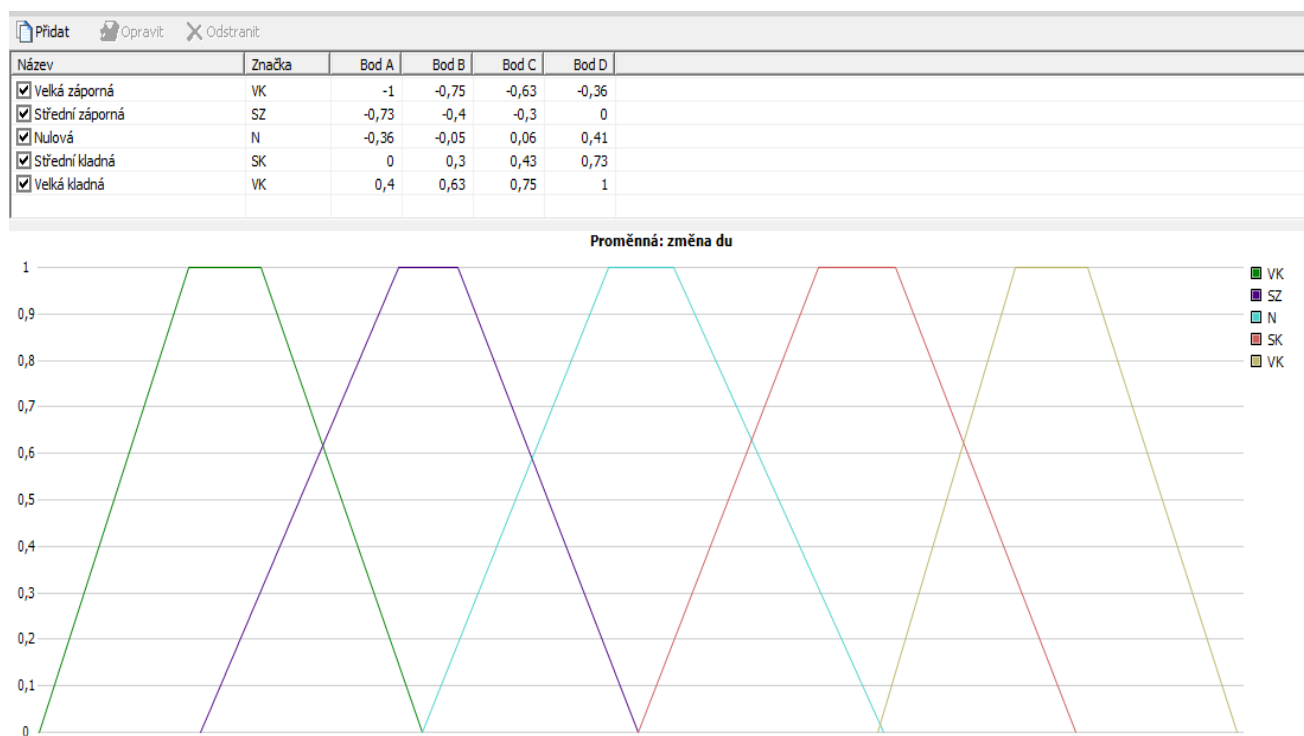
Obr.28 Rozsahy funkcí příslušnosti pro výstupní proměnnou fuzzy  $\Delta u$



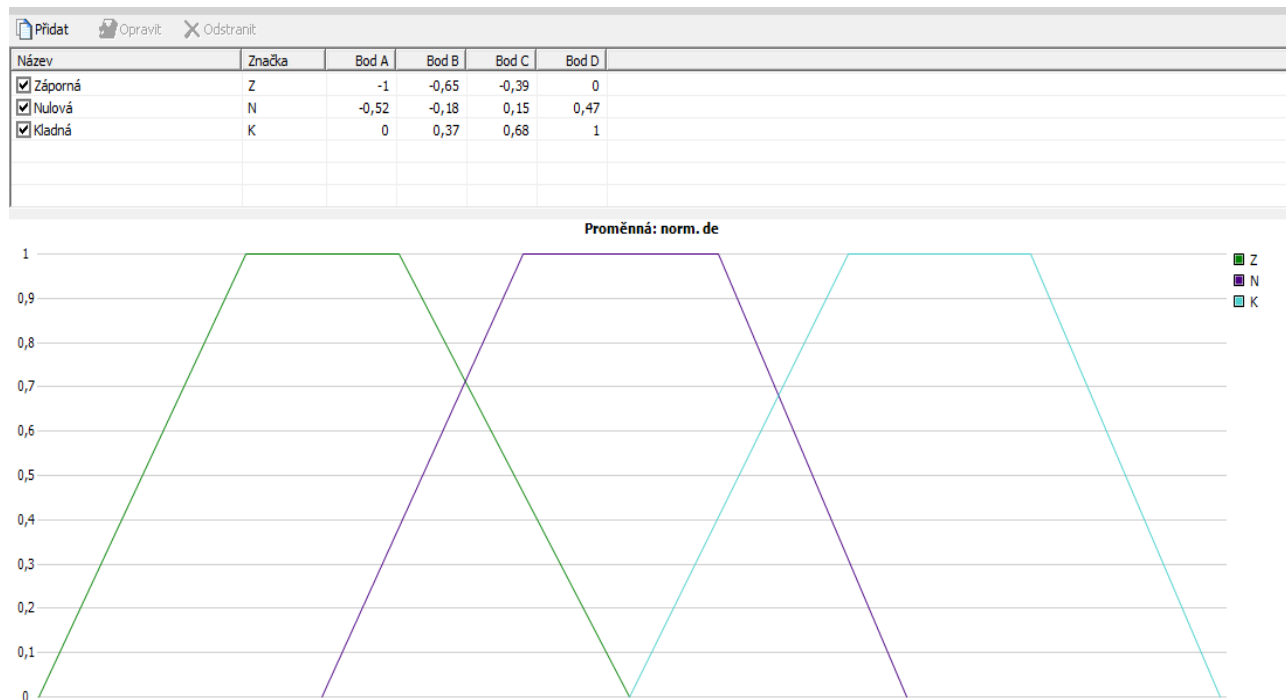
Obr. 29 Rozsahy funkcí příslušnosti pro výstupní proměnnou fuzzy u



Obr. 30 Rozsahy funkcí příslušnosti vstupní e normalizované – PID regulátor



Obr. 32 Rozsahy funkcí příslušnosti pro výstupní fuzzy  $\Delta u$  – PID regulátor

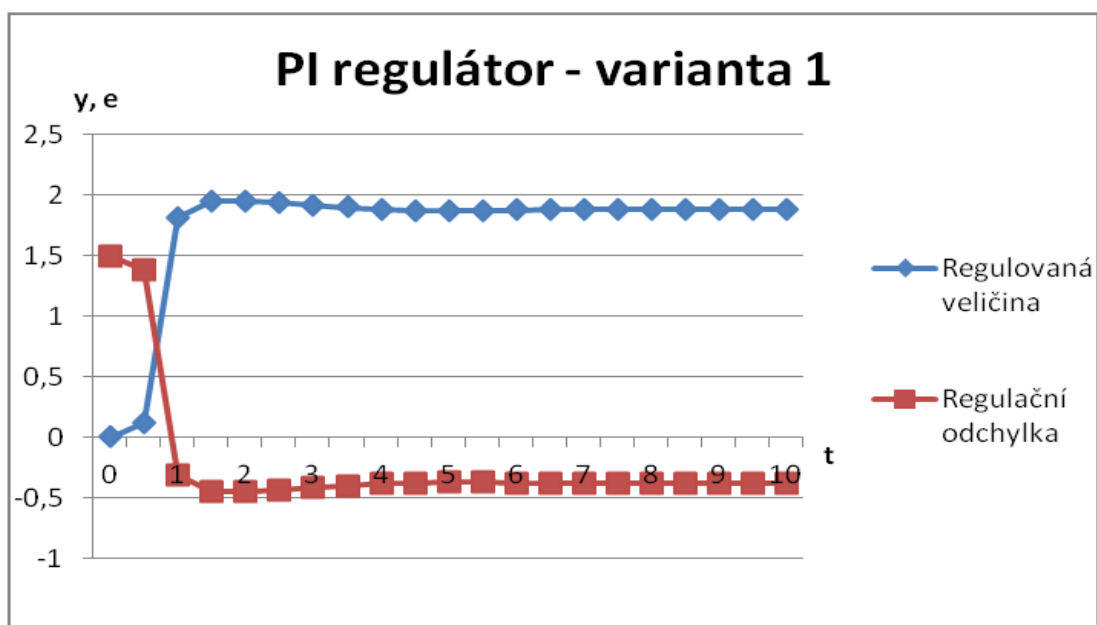


Obr.31 Rozsahy funkcí příslušnosti vstupní  $\Delta e$  normalizované – PID regulátor

### 1) PI regulátor

		$\Delta e$		
		$Z$	$N$	$K$
$e$	$VZ$	<b>VZ</b>	<b>SZ</b>	<b>N</b>
	$SZ$	<b>VK</b>	<b>SZ</b>	<b>N</b>
	$N$	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N</b>
	$SK$	<b>N</b>	<b>SK</b>	<b>VK</b>
	$VK$	<b>N</b>	<b>SZ</b>	<b>VK</b>

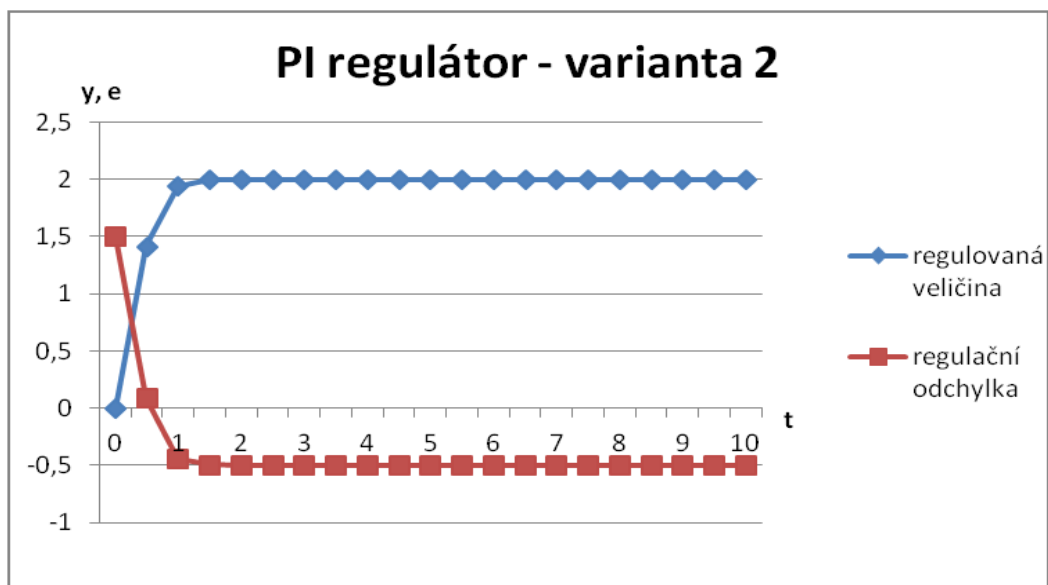
Obr. 33 Baze pravidel PI regulátor – varianta 1



Obr. 34 Graf závislosti  $y$  a  $e$  na čase

		$\Delta e$		
		$Z$	$N$	$K$
$e$	$VZ$	<b>VK</b>	<b>SZ</b>	<b>N</b>
	$SZ$	<b>VK</b>	<b>SZ</b>	<b>N</b>
	$N$	<b>VK</b>	<b>SK</b>	<b>VK</b>
	$SK$	<b>N</b>	<b>SK</b>	<b>VK</b>
	$VK$	<b>N</b>	<b>SZ</b>	<b>VK</b>

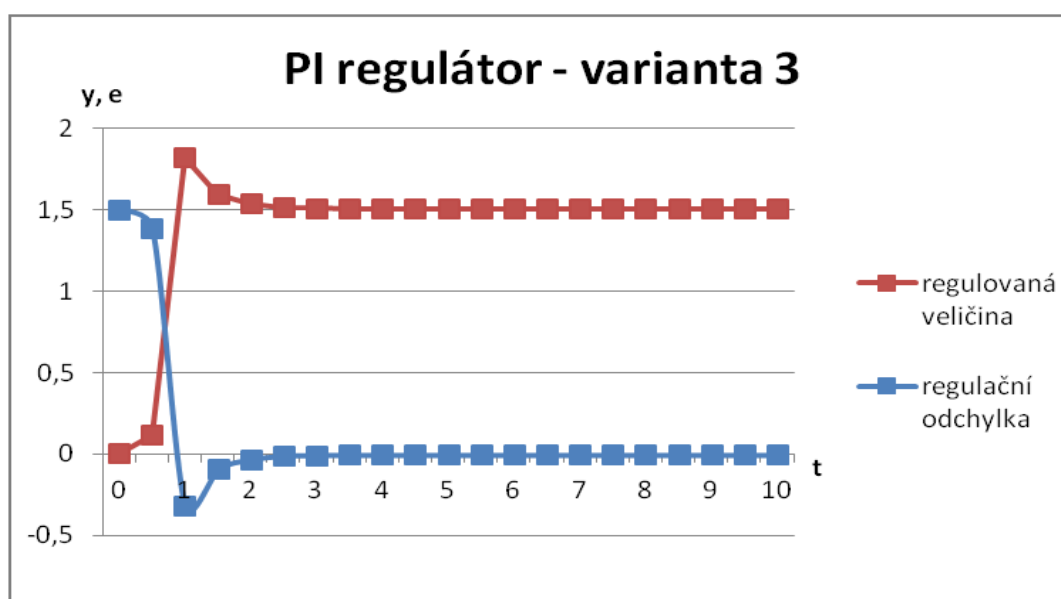
Obr. 35 Baze pravidel PI regulátor – varianta 2



Obr. 36 Graf závislosti  $y$  a  $e$  na čase

		$\Delta e$		
		$Z$	$N$	$K$
$e$	$VZ$	SZ	SZ	N
	$SZ$	VK	SZ	N
	$N$	N	N	N
	$SK$	N	SK	VK
	$VK$	N	SK	SK

Obr. 37 Baze pravidel PI regulátor – varianta 3



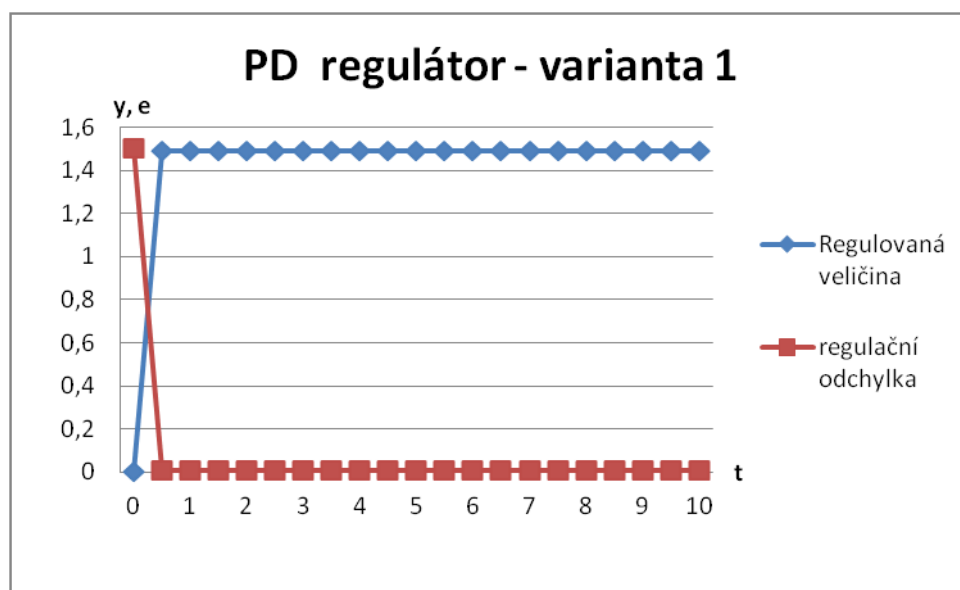
Obr. 38 Graf závislosti  $y$  a  $e$  na čase

Uvedené tři grafy představují výstupy třech různě nastavených skupin pravidel. Báze pravidel jsou umístěny nad každým grafem, který z nich vychází. Pro PI regulátor vyšla nejlépe varianta číslo 3 (Obr. č. 38). Zde se regulační odchylka ustálí na hodnotě nula a regulovaná veličina v hodnotě 1,5, což odpovídá zvolené hodnotě žádané veličiny. Předchozí dvě varianty, které znázorňují grafy č. 34 a č. 36, se sice také ustálí a dokonce v lepším čase, než poslední varianta. Ovšem hodnota regulované veličiny je vyšší než zadaná žádaná hodnota a regulační odchylka klesla příliš pod požadovanou mez.

## 2) PD regulátor

		$\Delta e$		
		$Z$	$N$	$K$
$e$	$VZ$	SK	SK	VK
	$SZ$	SK	SK	VK
	$N$	SK	SK	VK
	$SK$	SK	VK	VK
	$VK$	SK	VK	VK

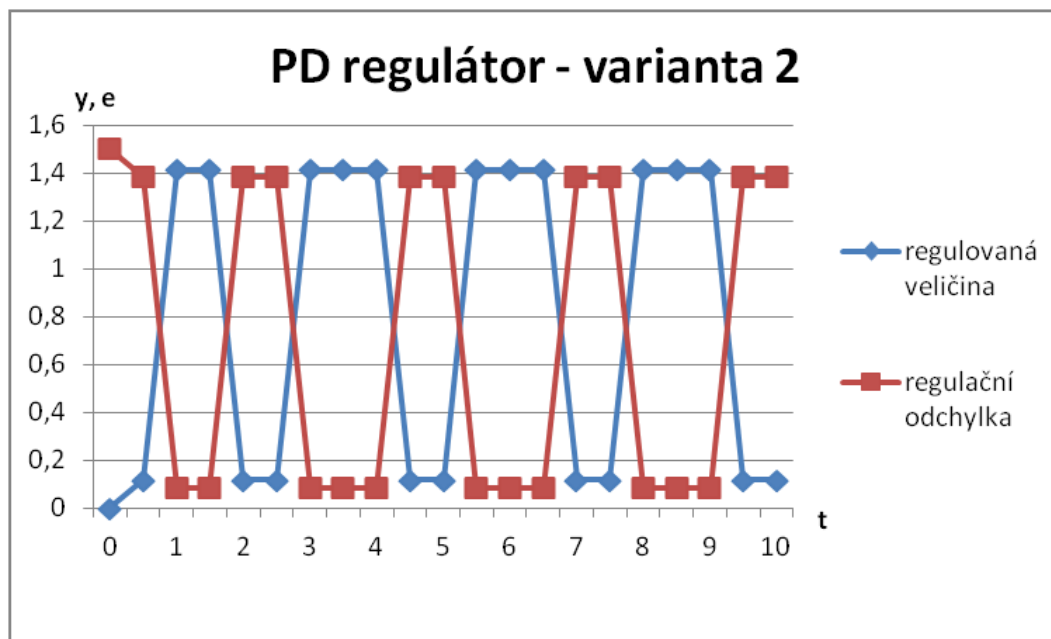
Obr. 39 Báze pravidel PD regulátor – varianta 1



Obr. 40 Graf závislosti  $y$  a  $e$  na čase

		$\Delta e$		
		$Z$	$N$	$K$
$e$	$VZ$	<b>SZ</b>	<b>SZ</b>	<b>SK</b>
	$SZ$	<b>SZ</b>	<b>N</b>	<b>SK</b>
	$N$	<b>SK</b>	<b>N</b>	<b>SK</b>
	$SK$	<b>SZ</b>	<b>SK</b>	<b>SK</b>
	$VK$	<b>N</b>	<b>SK</b>	<b>VK</b>

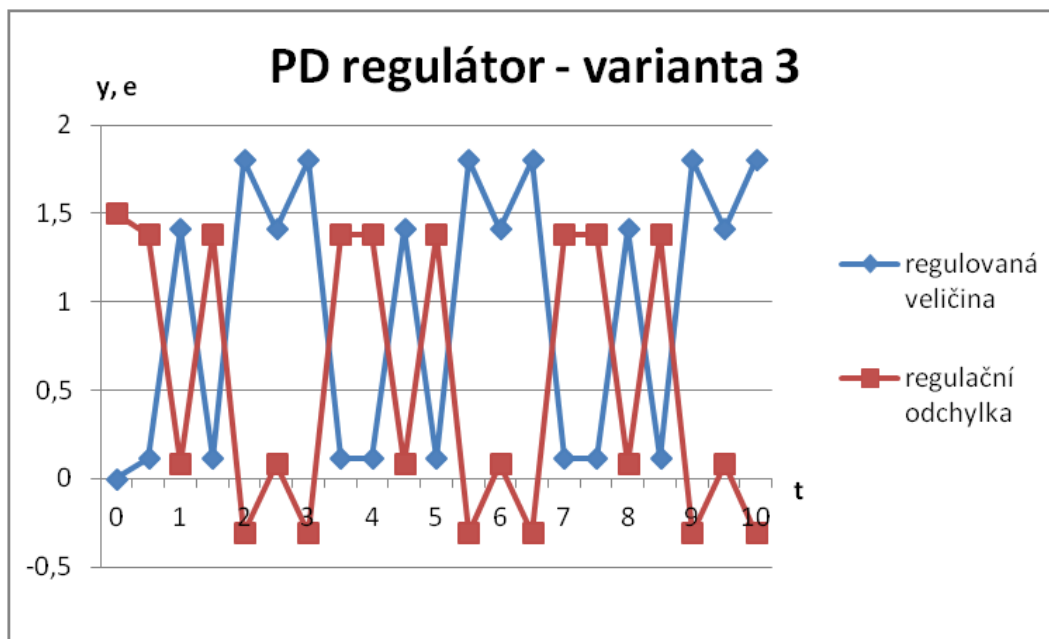
Obr. 41 Baze pravidel PD regulátor - varianta 2



Obr. 42 Graf závislosti  $y$  a  $e$  na čase

		$\Delta e$		
		$Z$	$N$	$K$
$e$	$VZ$	<b>VK</b>	<b>SZ</b>	<b>SK</b>
	$SZ$	<b>SZ</b>	<b>N</b>	<b>SK</b>
	$N$	<b>VK</b>	<b>N</b>	<b>VK</b>
	$SK$	<b>SZ</b>	<b>N</b>	<b>SK</b>
	$VK$	<b>N</b>	<b>SK</b>	<b>VK</b>

Obr. 43 Baze pravidel PD regulátor - varianta 3



Obr. 44 Graf závislosti  $y$  a  $e$  na čase

Při seřizování PD regulátoru docházelo k pravidelným oscilacím v případě, že byla zvolena nesprávná báze pravidel. Čím více byly zasazeny nulové a záporné hodnoty do báze pravidel (Obr. č. 41 a č. 43), tím větší oscilace nastaly, což znázorňují grafy č. 42 a č. 44. Jak je vidět u varianty č. 1 (Obr. č. 40), regulační odchylka a regulovaná veličina se ustálily na požadovaných hodnotách pomocí kladných termů, a to téměř okamžitě.



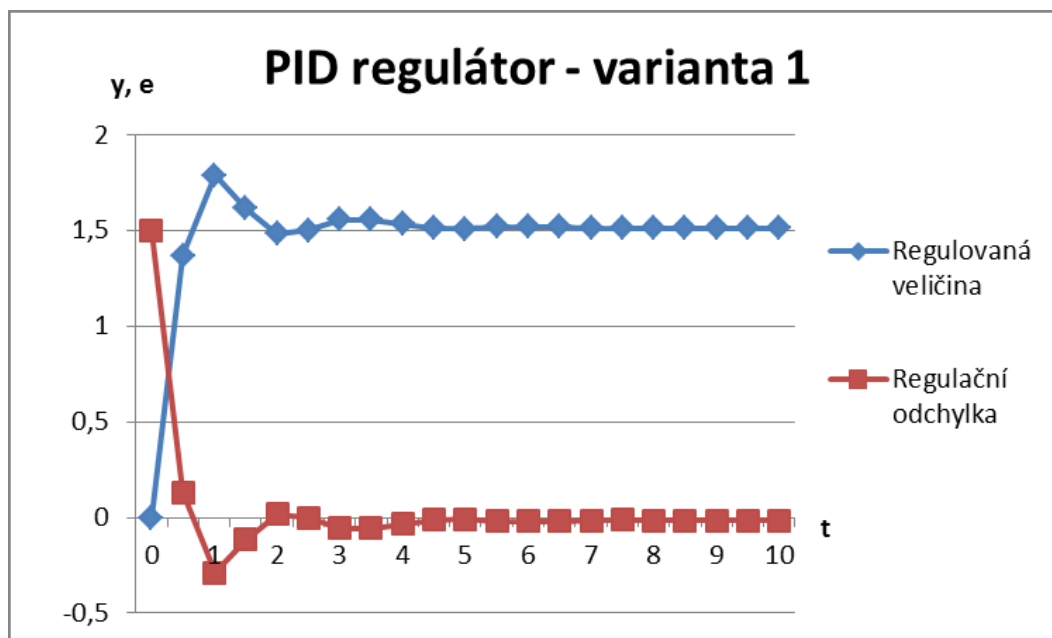
### 3) PID regulátor

		$\Delta e$		
		$Z$	$N$	$K$
$e$	$VZ$	SK	SK	SZ
	$SZ$	SZ	N	SK
	$N$	SZ	SK	SK
	$SK$	SK	N	N
	$VK$	N	SK	VK

Obr.45 Baze pravidel PID regulátoru (PI báze) – varianta 1

		$\Delta e$		
		$Z$	$N$	$K$
$e$	$VZ$	SZ	SZ	N
	$SZ$	SZ	SZ	N
	$N$	SZ	N	SK
	$SK$	N	SK	SK
	$VK$	N	SK	SK

Obr.46 Baze pravidel PID regulátoru (PD báze) – varianta 1



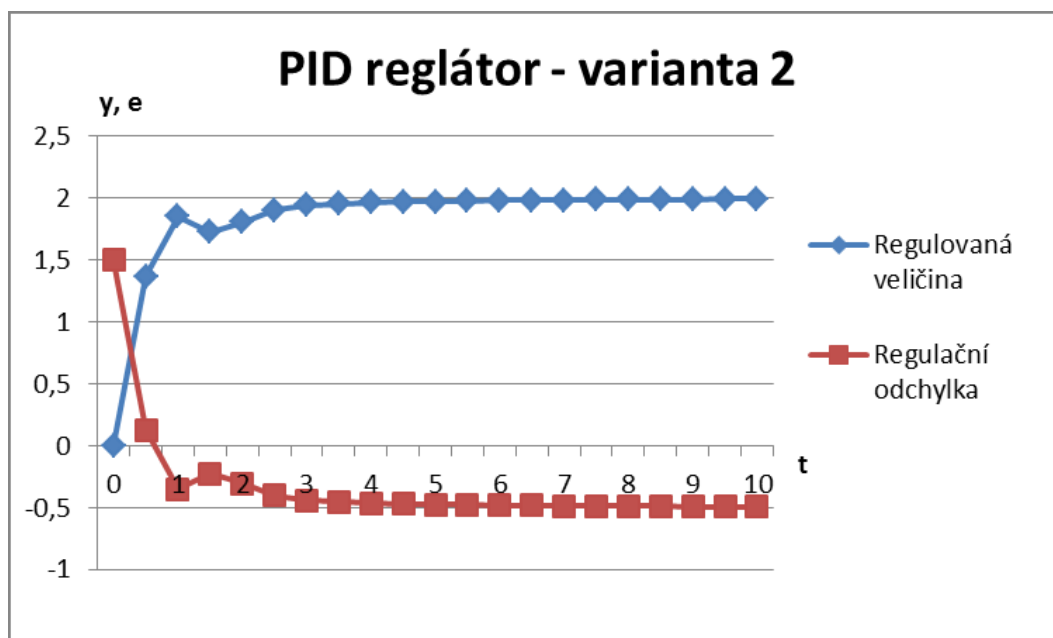
Obr.47 Graf závislosti  $y$  a  $e$  na čase

		$\Delta e$		
		$Z$	$N$	$K$
$e$	$VZ$	$VZ$	$SZ$	$N$
	$SZ$	$SZ$	$SZ$	$N$
	$N$	$N$	$SK$	$SK$
	$SK$	$N$	$SK$	$SK$
	$VK$	$N$	$SK$	$VK$

Obr.48 Bázé pravidel PID regulátoru (PI báze) – varianta 2

		$\Delta e$		
		$Z$	$N$	$K$
$e$	$VZ$	$SZ$	$SZ$	$N$
	$SZ$	$SZ$	$SZ$	$N$
	$N$	$SZ$	$N$	$SK$
	$SK$	$N$	$SK$	$SK$
	$VK$	$N$	$SK$	$SK$

Obr.49 Bázé pravidel PID regulátoru (PD báze) – varianta 2



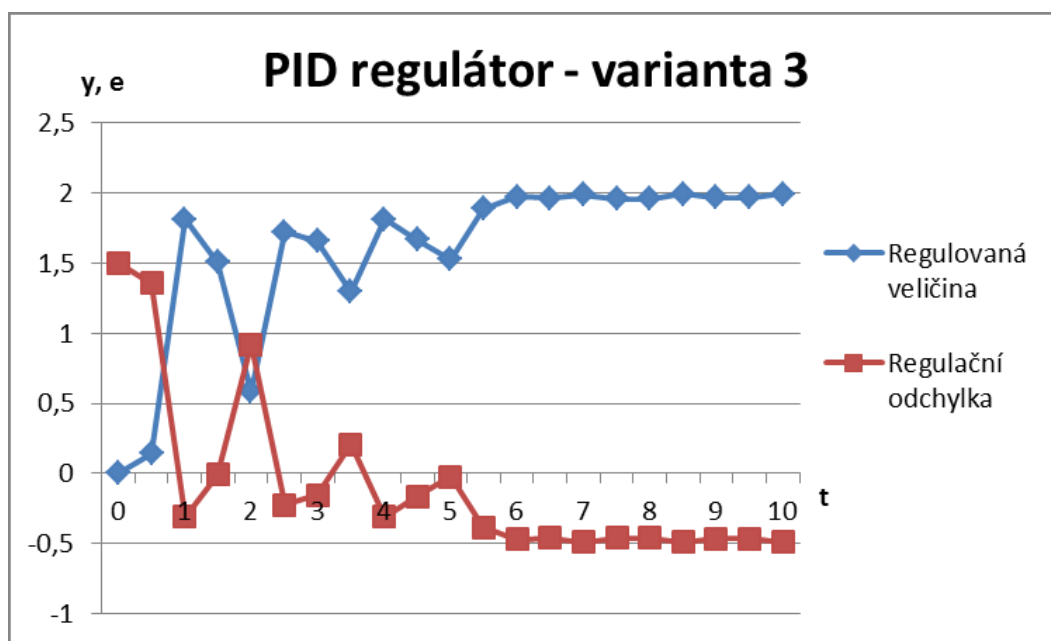
Obr.50 Graf závislosti  $y$  a  $e$  na čase

		$\Delta e$		
		$Z$	$N$	$K$
$e$	$VZ$	SZ	SZ	N
	$SZ$	SZ	N	N
	$N$	SZ	N	VK
	$SK$	N	N	SK
	$VK$	N	SK	SK

Obr.51 Báze pravidel PID regulátoru (PI báze) – varianta 3

		$\Delta e$		
		$Z$	$N$	$K$
$e$	$VZ$	SZ	SZ	SK
	$SZ$	SK	N	N
	$N$	N	N	N
	$SK$	SK	N	SK
	$VK$	N	SK	VK

Obr.52 Báze pravidel PID regulátoru (PD báze) – varianta 3



Obr.53 Graf závislosti  $y$  a  $e$  na čase

V případě PID regulátoru měla nejlepší průběh soustava v prvním případě (graf č. 47). Zde došlo k překmitu, podobně jako v případě PI regulátoru. Následně se však soustava začala stabilizovat na požadované hodnoty. PID regulátor tvořily dvě báze pravidel, báze PI a báze PD. Výsledné hodnoty udával jejich součet. Nulové hodnoty termů PD báze opět vytvořily

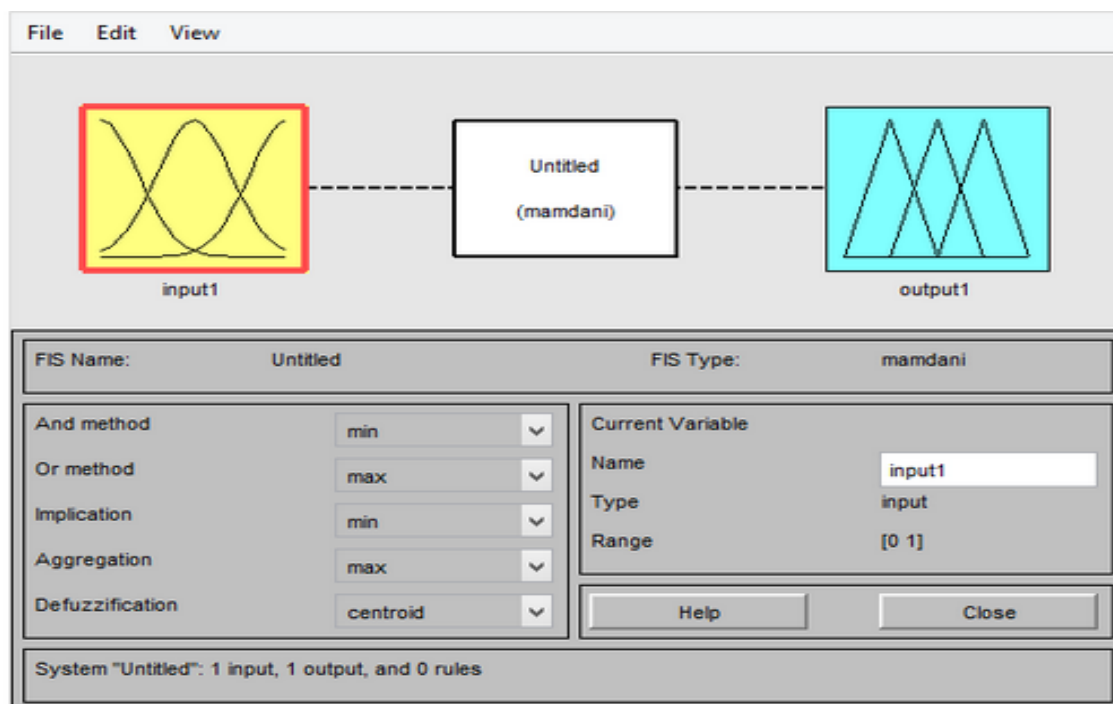
oscilace, jak je patrné z grafu č. 53. Ty se sice ustálily, ale na vyšších respektive nižších hodnotách, než byly žádoucí a v delším časovém období. Varianta č. 2 (graf č. 50) měla sice hladký průběh. K ustálení došlo v krátkém časovém intervalu, ale hodnoty řešených veličin opět nesouhlasily s požadovanými hodnotami.

## 5.4 Fuzzy Logic Toolbox

Dalším možným nástrojem pro navržení a ladění báze pravidel je Fuzzy Logic Toolbox (Matlab). Tento toolbox umožňuje naplnit znalostní i datovou bázi fuzzy systému. Skládá se z pěti základních nástrojů pro vytvoření, editaci a ladění fuzzy modelu.

### 1. FIS editor (Fuzzy Inference System)

V grafickém okně existují tři typy bloků, a to vstupní proměnné, inference a výstupní proměnné. Levá část okna slouží k zadání způsobu výpočtu metod AND, OR, atd. V pravé části jsou viditelné parametry jednotlivých proměnných. Typ inferenčního mechanismu a metoda defuzzyfikace je vybírána již v tomto kroku na rozdíl od expertního systému NTS, kde se tyto parametry volí až při přímém modelování soustavy.

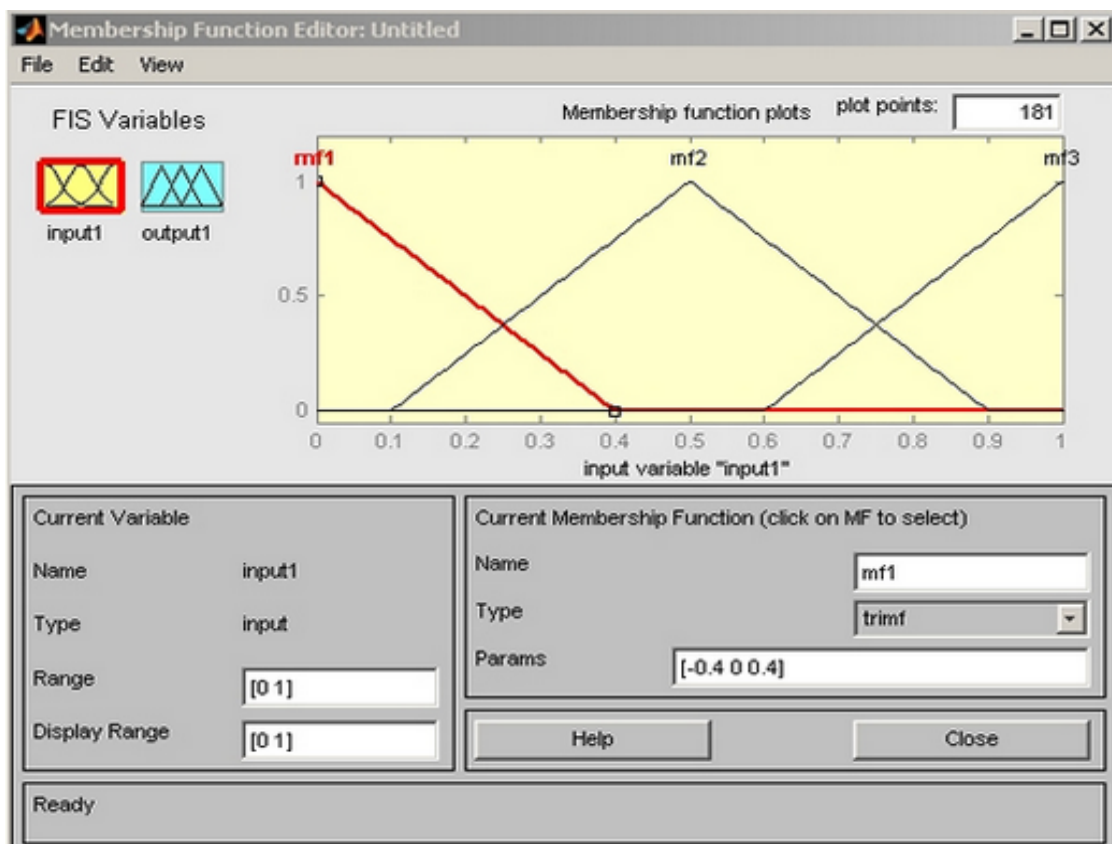


Obr. 54 FIS editor

### 2. Editor funkcí příslušnosti (Membership Function Editor)

Editor slouží pro definování rozsahů a funkcí příslušnosti proměnných. V levém horním rohu jsou viditelné všechny proměnné nastavené v předchozím kroku, přičemž

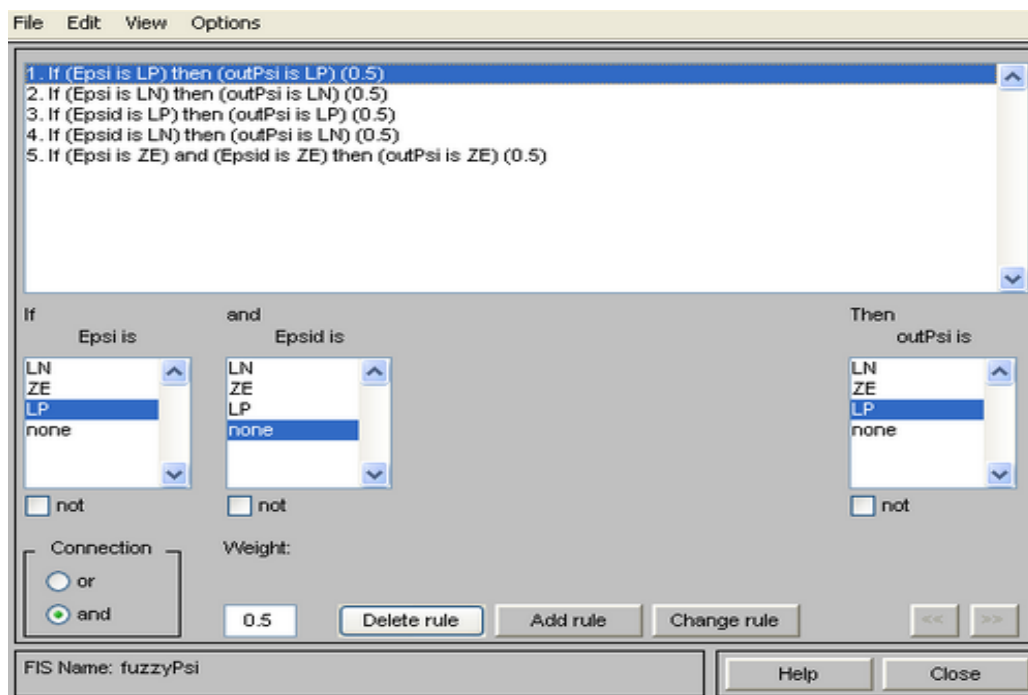
při kliknutí na ikonu proměnné se právě ta stane aktivní a všechny ostatní okna slouží pro její editaci.



Obr.55 Editor funkcí příslušnosti

### 3. Editor pravidel (Rule Editor)

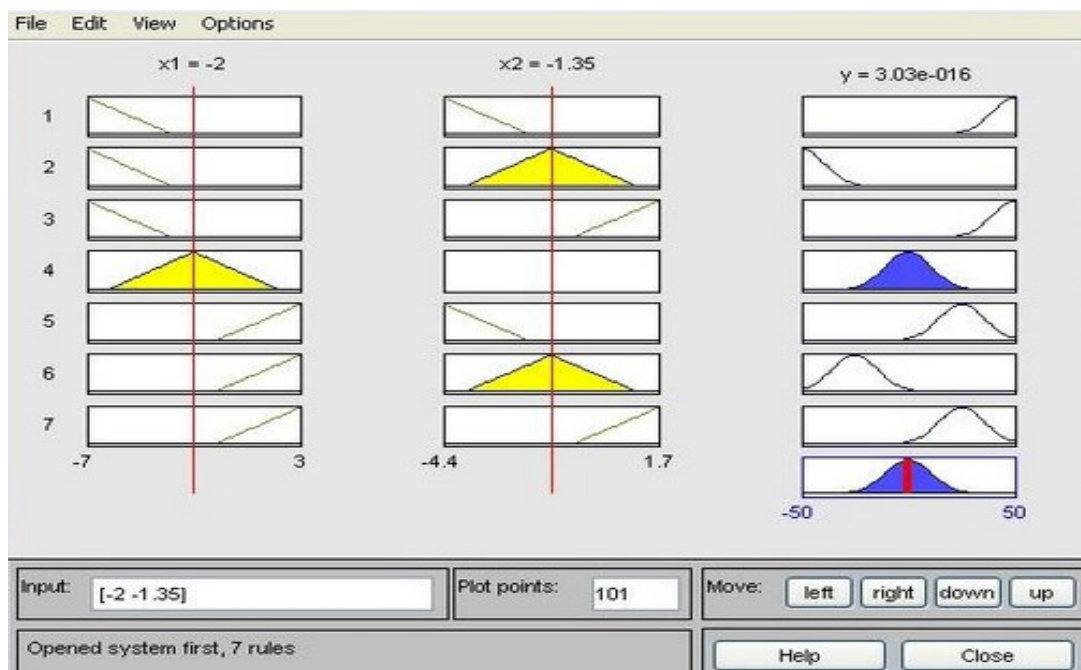
Editor pravidel je určen pro definování pravidel, která určují závislost mezi vstupními a výstupními proměnnými. Odpovídá druhému oknu expertního systému NTS *BÁZE PRAVIDEL*.



Obr.56 Editor pravidel

#### 4. Rule Viewer

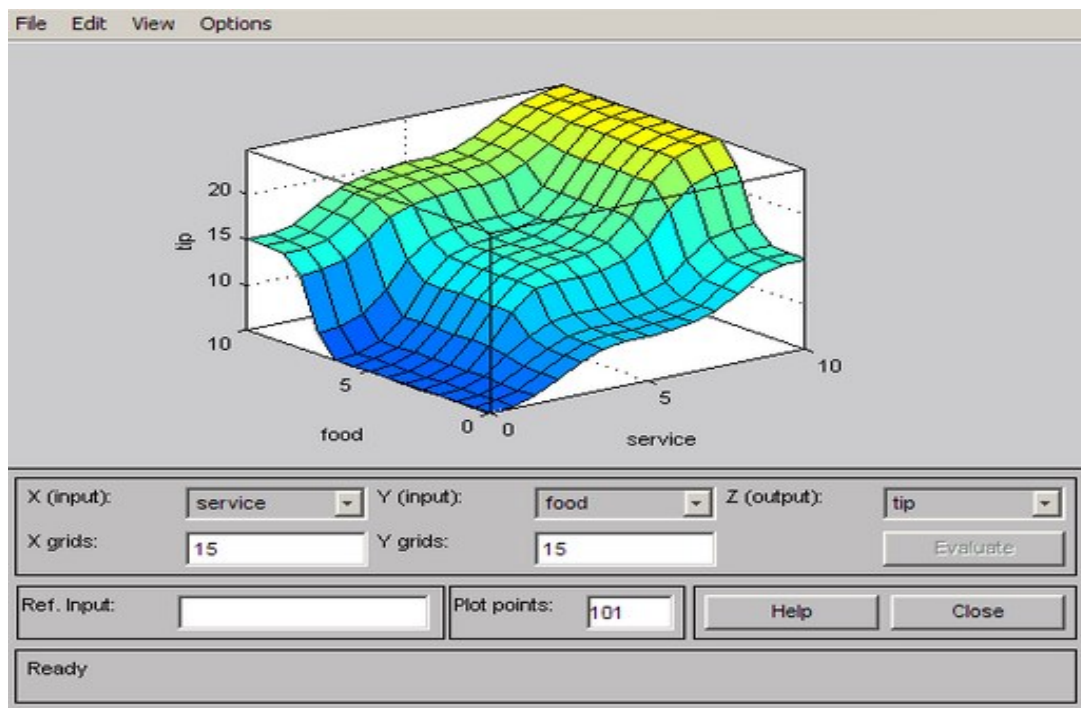
Graficky zobrazuje nastavené pravidla a výsledky inference pro zadané hodnoty vstupů. Umožňuje zobrazit konkrétní hodnotu výstupu pro konkrétní hodnoty vstupů.



Obr.57 Rule Viewer

## 5. Surface Viewer

Výstupem je grafické zobrazení závislosti výstupu na vstupech. Tyto závislosti vyobrazí pro všechny možné hodnoty vstupů.



Obr. 58 Surface Viewer

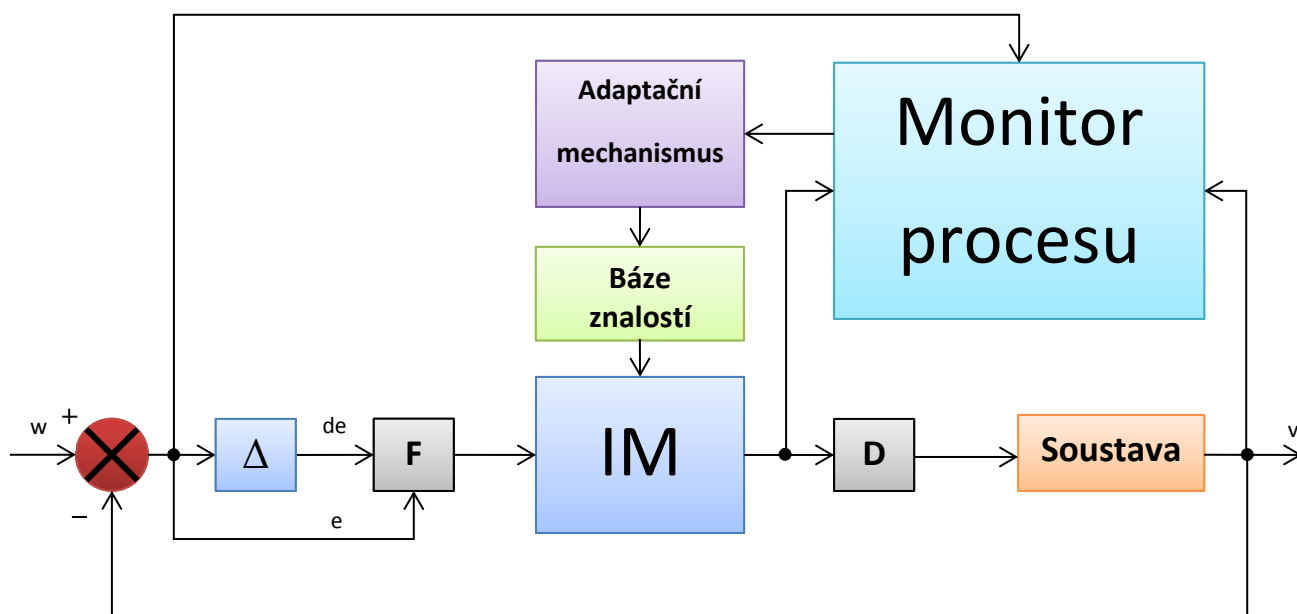
Kapitola Fuzzy Logic Toolbox je zde uvedena pouze jako další možné řešení úkolu diplomové práce. Báze pravidel nebyla navrhována v programu Matlab, přesto je vhodné zde kapitolu zařadit z důvodu uvedení více možných metod, kterými je příhodné a účelné navrhovat bázi pravidel.

Hlavním důvodem volby expertního systému NTS byla jednodušší možnost nastavení pravidel. Expertní systém sám automaticky vygeneruje všechny možné kombinace vstupních proměnných a uživatel pouze přiřadí vhodný tvar výstupní proměnné, kdežto v editoru pravidel musí uživatel nastavit nejprve kombinace vstupů a poté k nim přiřadit příslušné hodnoty výstupu.

## 6. Adaptivní fuzzy regulátor

V předchozí kapitole byla vysvětlena tvorba a ladění báze pravidel. U klasických fuzzy regulátorů je nutné, aby bázi pravidel tvořil a upravoval přímo expert. Celý proces je velmi zdoluhavý a ne vždy je podmínkou nalezení optimálního řešení pro danou soustavu. Právě pro složitější soustavy je v některých případech vhodné použití právě adaptivního fuzzy regulátoru, který je schopný sám doladovat a měnit parametry báze znalostí. Jeho největší výhodou je využití v procesech, kde se parametry a charakteristiky mění s časem. Tento typ regulátoru oproti klasickému fuzzy regulátoru vlastně pracuje s online identifikací procesu, což umožňuje přímé navržení tvorby báze znalostí. [17]

Sestava adaptivních regulátorů je obdobná jako u fuzzy regulátorů s tím rozdílem, že obsahují navíc bloky monitor procesu a adaptační mechanismus. Obecné schéma je znázorněné na obrázku č. 59.



Obr.59 Schéma obecného adaptivního fuzzy regulátoru

Adaptivní fuzzy regulátory můžeme dělit ze dvou hledisek, a to podle bloku monitor procesu a podle toho, které parametry báze znalostí je možné měnit. Dle monitoru procesu rozeznáváme výkonnostní adaptivní regulátory (angl. Performance-adaptive). Ty obsahují monitor měření výkonnosti, který podle jistých kritérií vyhodnocuje kvalitu činnosti regulátoru a adaptační mechanismus následně mění bázi znalostí podle míry vhodnosti. Kritérii mohou být např. doba náběhu, překmit, frekvence oscilací atd. Parametricky adaptivní



regulátory (angl. Parameter-adaptive) jsou další typem v rozdělení dle monitoru procesu. Tyto regulátory v sobě obsahují model soustavy, takže parametry modelu jsou neustále aktualizovány. Na základě měnících se parametrů báze znalostí (normalizační koeficienty, funkce příslušnosti, pravidla) se rozlišují samoladící adaptivní fuzzy regulátory (angl. Self-tunning) a samoorganizační adaptivní fuzzy regulátory (angl. Self-organizing). V případě prvního typu jde o změnu normalizačních koeficientů a hodnot parametrů funkcí příslušnosti. Druhý typ je schopen modifikovat bázi pravidel, měnit je, doplňovat nebo mazat. Jde vlastně o rozšíření samoladících adaptivních fuzzy regulátorů.

Adaptivní fuzzy regulátory je vhodné využívat v případě, kdy je soustava nedostatečně popsána, nebo není dostatek expertů, kteří by byli schopni definovat řídicí pravidla.

## **7. Závěr**

Cílem práce bylo popsat regulátory a regulované soustavy, dále potom vysvětlit princip fuzzy řízení a v praktické části navrhnout bázi pravidel pro fuzzy regulátor. Teoretická část zahrnuje právě první dva body. V kapitole č. 2 byla obecně popsána fuzzy logika, na jakém principu pracuje. Čím se vyznačují její množiny a jak jsou charakterizovány operace s fuzzy množinami. Kapitola č. 3 objasňuje princip fuzzy regulace. Obrázek č. 3 v podstatě představuje celou třetí kapitolu. Ve schématu jsou zakresleny jednotlivé pochody fuzzy regulace, které jsou dále rozepsány a vysvětleny. Popisuje vlastně kompletní průběh dat, v jakém tvaru jsou přivedeny do regulátoru, jakými operacemi prochází uvnitř regulátoru a jaké výsledky jsou očekávány na výstupu z regulátoru. Čtvrtá kapitola rozděluje fuzzy regulátory na dvě základní skupiny podle inferenčního mechanismu, a to na fuzzy regulátory typu Mamdani a typu Takagi-Sugeno. Přičemž pro diplomovou práci byl zvolen typ Mamdani, který je následně rozdělen přímo podle typu regulátoru. Vybrány byly základní typy regulátoru, tedy PI, PD a PID. První část diplomové práce se tedy zabývala teoretickou stránkou fuzzy logiky a jejími principy. Největší snahou bylo vysvětlit právě ty pojmy a postupy, které byly následně použity v praktické části přímo při tvorbě báze pravidel.

Jak už bylo napsáno výše, experimentální část diplomové práce se zabývala přímou tvorbou báze pravidel pro danou soustavu. Pro realizaci zadaného úkolu byly využity dva programy. Model regulované soustavy, který obsahoval veškeré výpočty a samotnou posloupnost výpočtů, byl vytvořen v programu Excel. Tento tabulkový program byl pro danou problematiku naprosto vyhovující. Veškeré výsledky byly zachyceny jednotlivě v grafech. Tato skutečnost umožnila okamžité hodnocení návrhů, které byly zkoušeny. Samotné báze pravidel se testovaly pomocí expertního systému NTS. Pro každý typ regulátoru bylo navrženo více druhůází pravidel, kvůli možnosti porovnání. V praktické části jsou pro každý druh regulátoru uvedeny tři variantyází. Pro každou variantu PID regulátoru bylo potřeba navrhnout dvě báze. Důvod je jasně zřetelný ze schématu PID regulátoru, které je vyobrazeno v obrázku číslo 17. PID regulátor je vlastně součet složek PI a PD, přičemž každá z uvedených složek obsahuje jinou výstupní veličinu. V praktické části byl také srovnáván použitý expertní systém NTS se simulačním programem Fuzzy Logic Toolbox (Matlab). Důvod výběru expertního systému byl hlavně v jeho jednoduchosti. Tvorba báze pravidel je časově náročný proces. V tomto případě bylo potřeba vytvořit více druhůází pravidel. Díky expertnímu systému NTS byl proces tvorbyází rychlejší při zachování stejné kvality výsledků. Dalším důvodem pro volbu expertního systému byla skutečnost, že expertní systém

NTS je schopen sám kombinace vstupních veličin s tím, že expert doplní třetí sloupec určený pro výstupní veličinu. Což bylo velmi oceněno při takovém počtu bází pravidel. Poslední kapitola experimentální popisovala další typy regulátorů pracujících na principu fuzzy teorie. Byla zde uvedena ovšem pouze pro větší přehled v oblasti fuzzy regulace. Vytvořené báze pravidel v expertním systému NTS mohou sloužit jako základ, který lze použít pro adaptivní fuzzy regulátor.

Jak již bylo uvedeno v úvodu, fuzzy logika si našla uplatnění v mnoha vědních oborech a nadále její aplikovatelnost roste. Právě tyto skutečnosti byly hlavními argumenty pro volbu tématu diplomové práce.

## Použitá literatura:

- [1] Webgarden : *Fuzzy logic* [online]. [cit. 2015-04-10].  
Dostupné na: <[wwwhttp://webcache.googleusercontent.com](http://webcache.googleusercontent.com)>
- [2] VYSOKÝ, Petr. *Fuzzy řízení*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01429-8.
- [3] Moodle.sspbrno: *Fuzzy logika* [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné na: [https://moodle.sspbrno.cz/pluginfile.php/5569/mod\\_resource/content/0/KOLU/Informatika/fuzzy.pdf](https://moodle.sspbrno.cz/pluginfile.php/5569/mod_resource/content/0/KOLU/Informatika/fuzzy.pdf)
- [4] WITOLD, Pedrycz. *Fuzzy control and fuzzy systems*, 1993, 2. vydání, 350 s. ISBN 0-8638-131-5.
- [3] Kirp.chtf.stuba: *Fuzzy řízení a regulace* [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné na : <<https://www.kirp.chtf.stuba.sk/~bakosova/wwwRTP/tar2fuz.pdf>>
- [4] NOVÁK, Vilém. *Fuzzy množiny a jejich aplikace*, Praha 1990, 2. Vydání, 148 s. ISBN 80-03-00325-3
- [5] POKORNÝ, Miroslav, MOŠTEK, Martin, ŽELASKO, Petr. *Znalostní systémy řízení*, VŠB – Technická univerzita v Ostravě, 2005, 121 s. [online]. [cit. 2015-03-01].  
Dostupné na: <[www: http://rc112.vsb.cz/nowakova/materials/zsr/ZSR\\_old.pdf](http://rc112.vsb.cz/nowakova/materials/zsr/ZSR_old.pdf)>
- [6] Felk.cvut: Bakalářská práce, *Řízení couvajícího vozíku s využitím fuzzy logiky*, Praha 2008 [online] [cit. 2015-02-19] [online] Dostupné na: <[www: https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/b/b0/Bp\\_2008\\_kucera\\_vladimir.pdf](https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/b/b0/Bp_2008_kucera_vladimir.pdf)>
- [7] Railvolution: *Rozhodovací systémy při posuzování technického stavu kolejových vozidel* [online] [cit. 2015-02-19]. Dostupné na: <[www: http://www.railvolution.net/czechraildays/2002/seminare/nt33.pdf](http://www.railvolution.net/czechraildays/2002/seminare/nt33.pdf)>
- [8] Muni: Disertační práce, *Teorie fuzzy modelů a jejich využití a interpretace pro rozvoj cykloturistiky jihomoravského kraje*, Brno 2014. [online] [cit. 2015-03-01].  
Dostupné na: <[www: http://is.muni.cz/th/248680/prif\\_d/disertacni\\_prace\\_kolisko.pdf](http://is.muni.cz/th/248680/prif_d/disertacni_prace_kolisko.pdf)>
- [9] Fm.vslib: *Metody defuzzifikace*. [online] [cit. 2015-03-02].  
Dostupné na: <[www: http://www.fm.vslib.cz/krtsub/fm/trě/tar2\\_fuz.pdf](http://www.fm.vslib.cz/krtsub/fm/trě/tar2_fuz.pdf)>

- [10] BindiChen.co.uk: *Mamdani fuzzy models*. [online] [cit. 2015-03-20]. Dostupné na:  
<<http://www.bindichen.co.uk/post/AI/mamdani-fuzzy-model.html>>
- [11] FuzzyHeli: *Fuzzy-Control of a Model Helicopter*. [online] [cit. 2015-04-08]. Dostupné na:  
<<http://control.ee.ethz.ch/~ifa-fp/wiki/index.php?n=Main.FuzzyHeli>>
- [12] Vutbr: Disertační práce, *Optimalizace návrhu fuzzy řízení vzhledem k rozsahu ohybů paralelního mechanismu*. [online][cit. 2015-03-07]. Dostupné na:  
<[www: http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=56625](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=56625)>
- [13] Atpjournal: *Aplikace umělé inteligence v řízení elektrických regulačních pohonů (1)*. [online][cit. 2015-03-07]. Dostupné na:  
<[www: http://www.atpjournal.sk/buxus/docs/atp-2004-02-41\\_42.pdf](http://www.atpjournal.sk/buxus/docs/atp-2004-02-41_42.pdf)>
- [14] Elektrorevue: *Modrení principy fuzzy modelování nelineárních soustav*. [online][cit. 2015-03-08]. Dostupné na:  
<[www: http://www.elektrorevue.cz/clanky/04033/index.html](http://www.elektrorevue.cz/clanky/04033/index.html)>
- [15] Fs.cvut: *Fuzzy regulátory Mamdaniho a Takagi-Sugenoova typu*. [online][cit. 2015-03-10]. Dostupné na: <[www: http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/ui/fuzzy\\_regulatory.pdf](http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/ui/fuzzy_regulatory.pdf)>
- [16] Matlab.fei.tuke: *Optimalizace regulátorů*. Brno 2005, 112 s., [online][cit. 2015-03-11]. Dostupné na:  
<[www: http://matlab.fei.tuke.sk/raui/doc/OptimalizaceRegul\\_Piv\\_w.pdf](http://matlab.fei.tuke.sk/raui/doc/OptimalizaceRegul_Piv_w.pdf)>
- [17] Ro.feri.uni: *Intelligent control techniques in mechatronics – fuzzy logic* [online] [cit. 2015-04-05]. Dostupné na:  
<[http://www.ro.feri.uni-mb.si/predmeti/int\\_reg/Predavanja/Eng/4.Fuzzy%20logic/\\_38.html](http://www.ro.feri.uni-mb.si/predmeti/int_reg/Predavanja/Eng/4.Fuzzy%20logic/_38.html)>